Modelos e métodos de pesquisa operacional para determinação de estoque de segurança: uma revisão

NC Gon¸calvesa,ÿ , M. Sameiro Carvalhoa, Paulo Cortezb João

aCentro de Investigação ALGORITMI, Departamento de Produção e Sistemas, Universidade do Minho, 4710-057 Braga, Portugal
Centro de Investigação bALGORITMI, Departamento de Sistemas de Informação, Universidade do Minho, 4800-058 Guimarães, Portugal

---

Abstrato

Na gestão de inventário da cadeia de abastecimento é geralmente aceite que os stocks de segurança são uma estratégia adequada para lidar com a incerteza da procura e da oferta, com o objetivo de evitar rupturas de stock.
Os estoques de segurança têm sido objeto de intensa pesquisa, normalmente abrangendo os problemas de dimensionamento, posicionamento, gerenciamento e colocação. Aqui, estreitamos o escopo da discussão ao problema de dimensionamento do estoque de segurança, que consiste em determinar o nível de estoque de segurança adequado para cada produto. Este artigo relata os resultados de uma recente revisão sistemática da literatura (SLR) aprofundada de modelos e métodos de pesquisa operacional (OR) para dimensionar estoques de segurança. Até onde sabemos, esta é a primeira revisão sistemática da aplicação de abordagens baseadas em OR para investigar este problema. Um conjunto de 95 artigos publicados de 1977 a 2019 foi revisado para identificar o tipo de modelo empregado, bem como as técnicas de modelagem e os principais critérios de desempenho utilizados. No final, destacamos as lacunas atuais da literatura e discutimos possíveis direções e tendências de pesquisa que podem ajudar a orientar pesquisadores e profissionais interessados no desenvolvimento de novas abordagens baseadas em OR para determinação de estoques de segurança.

Palavras-chave: Estoques de segurança, Pesquisa operacional, Revisão sistemática de literatura, Gestão de estoques, Cadeia de suprimentos.

---

1. Introdução

A competitividade do mercado global e a necessidade de atender aos requisitos dos clientes têm desencadeado um aumento dos fatores de incerteza dentro das organizações [1]. Estes fatores estão frequentemente relacionados com a produção, o transporte, a procura, a oferta ou mesmo eventos externos, e podem assumir uma natureza de curto prazo (por exemplo, aumento, redução, cancelamento ou mesmo movimentos de encomendas para a frente e para trás) ou de longo prazo. (por exemplo, volatilidade dos preços) [2]. Lidar com a incerteza é, portanto, relevante dado que, além da sua presença inevitável em contextos operacionais do mundo real [3], é uma das principais questões na gestão da cadeia de abastecimento (SCM). Diversos estudos de investigação, especialmente no domínio da gestão de riscos da cadeia de abastecimento (SCRM) [4], têm-se centrado no desenvolvimento de técnicas capazes de gerir fenómenos de incerteza e as suas repercussões em todo o SC.
Em particular, como uma "função do nível de serviço do ciclo, da incerteza da procura, do tempo de reposição e da incerteza do tempo de espera" [5], os stocks de segurança são considerados uma estratégia adequada para evitar rupturas de stock [6] e para lidar com a variabilidade da oferta e da demanda [7, 8]. Na verdade, apesar dos desafios inerentes à sua gestão, Koh et al. [9] enfatizam que os estoques de segurança são uma das estratégias mais robustas para amenizar a incerteza da oferta e da demanda.

ÿCorrespondência: João NC Gon¸calves (e-mail: joao.goncalves@dps.uminho.pt)

Normalmente, os trabalhos de pesquisa sobre métodos de estoque de segurança abrangem os problemas de dimensionamento, posicionamento, gerenciamento e colocação. Dentro destes principais problemas, esta pesquisa restringe seu escopo às estratégias de dimensionamento de estoques de segurança, que consistem em determinar o nível de estoque de segurança adequado para cada produto [10]. É sabido que nenhum CS pode operar sem stocks de segurança [11] que, juntamente com fluxos financeiros e fundos adequados, são considerados relevantes para a prevenção de perturbações massivas de SC [12]. Com efeito, dadas as actuais preocupações com o impacto das perturbações do SC no desempenho empresarial, um relatório recente da Forbes [13] aponta que as empresas tenderão a ser menos tolerantes ao risco e à incerteza. Destaca particularmente a importância do planeamento de stocks de segurança para fazer face aos riscos de SC provenientes de cenários relacionados com desastres naturais (por exemplo, furacões, tsunamis, inundações) ou infecções epidémicas em massa (por exemplo, 2019-nCoV), que têm vindo a aumentar em todo o mundo.
Como um primeiro e importante passo antes de passar para problemas mais avançados de estoques de segurança, como determinar as localizações e quantidades ideais de estoques de segurança, de modo a manter os níveis de serviço desejados e, ao mesmo tempo, minimizar os custos (comumente referido como colocação de estoques de segurança [14]), consideramos que é de fundamental importância desenvolver um maior entendimento sobre como determinar corretamente os estoques de segurança para cada produto.

O objetivo deste artigo é fornecer uma visão concisa de como os acadêmicos que trabalham em SCM têm abordado o problema de dimensionamento de estoques de segurança, a partir de uma perspectiva de pesquisa operacional (PO). Embora exista uma grande quantidade de literatura sobre modelos de dimensionamento de estoques de segurança, pouca atenção tem sido dada a artigos de revisão neste campo específico. Por exemplo, o trabalho de Guide Jr e Srivastava [3] discute um conjunto de metodologias e técnicas para lidar com a incerteza em ambientes de planejamento de requisitos de materiais (MRP). Aponta diversas lacunas no contexto da literatura anterior. Caridi e Cigolini [10] forneceram uma perspectiva geral sobre métodos de amortecimento usados para diminuir a incerteza nos sistemas de produção. Os autores discutiram 14 artigos relacionados ao problema de dimensionamento de estoque de segurança como base para propor um novo modelo de estoque de segurança abrangendo duas estratégias de buffer: uma para enfrentar picos de demanda para um determinado nível de serviço (levando em conta sua distribuição de probabilidade) e outra para abordar a variabilidade da procura estável (através da análise da distribuição estatística dos erros de previsão). Mais tarde, Schmidt et al. [15] compilaram diversas abordagens estocásticas atualmente utilizadas para dimensionar estoques de segurança e conduziram um conjunto de estudos de simulação controlada a fim de avaliar o desempenho dos métodos propostos em termos da variância da demanda e do lead time de reposição. É digno de nota que a necessidade de abordagens dinâmicas para calcular os estoques de segurança é destacada pelos autores.

No entanto, ao pesquisar a literatura relacionada com a utilização de modelos e métodos de PO para resolver o problema de dimensionamento de stocks de segurança, descobrimos que faltam estudos que proporcionem um processo replicável e estruturado de reunião em torno de todos os trabalhos científicos relevantes sobre este assunto. tema de forma objetiva. Assim, motivado pela suposta dificuldade [15] quanto ao levantamento de dimensionamento de obras de estoque de segurança, talvez devido à sua ampla aplicação no campo do SCRM, este artigo apresenta uma revisão sistemática da literatura (SLR), de 1977 a 2019, de obras baseadas em OR. abordagens para dimensionar estoques de segurança. A contribuição da nossa pesquisa é tripla. Em primeiro lugar, compila e resume os esforços e técnicas de modelagem de última geração que foram estudados para dimensionar os estoques de segurança. Neste ponto, os artigos amostrados foram classificados, em termos do modelo/método OR proposto, em quatro categorias distintas. Cada artigo é posteriormente discutido e caracterizado de acordo com o tipo de modelo empregado, bem como a(s) técnica(s) de modelagem e principais critérios de desempenho considerados. Em segundo lugar, são sublinhadas as desvantagens e limitações das actuais abordagens de dimensionamento dos stocks de segurança. Terceiro, com base nas lacunas identificadas, fornecemos sugestões que podem servir como portas de oportunidade para pesquisas futuras neste tópico, tanto no contexto acadêmico quanto empresarial.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. A próxima seção relembra explicitamente algumas abordagens padrão comumente adotadas para tratar o problema de dimensionamento do estoque de segurança e que servem de base para muitas pesquisas atuais sobre esse tema. A seção 3 apresenta a metodologia e os objetivos da revisão e descreve a fase de seleção dos artigos. A seção 4 executa

análise descritiva dos artigos selecionados. Na seção 5, os artigos selecionados são categorizados de acordo com a estratégia proposta para dimensionamento dos estoques de segurança. Este processo constitui a base para a avaliação do material. Em seguida, concluímos na seção 6, destacando algumas lacunas importantes da literatura e possíveis direções para pesquisas futuras.

2. Estratégias tradicionais de dimensionamento de estoque de segurança

Os estoques de segurança são essencialmente afetados por seis fatores, incluindo nível de serviço, prazo de entrega, volatilidade da demanda, política de pedidos, comunalidade de componentes e custos de manutenção. As razões são bastante intuitivas. Uma estratégia ideal de estoque de segurança deve ser pequena o suficiente para reduzir os custos relacionados ao estoque e, ao mesmo tempo, satisfazer a demanda e os clientes de alto nível de serviço no prazo. Isto depende naturalmente de como lidar com os diferentes níveis de volatilidade da procura e de quão grande é a variação do prazo de entrega. Por outro lado, o tamanho das liberações de pedidos e o grau de uniformidade dos componentes também podem sugerir oportunidades para otimizar os níveis de segurança. Esta seção relembra abordagens estocásticas padrão para dimensionar estoques de segurança, com base em parâmetros normalmente distribuídos, que incorporam alguns dos fatores acima mencionados. Para um conhecimento abrangente sobre este tema, o leitor é remetido aos textos fundamentais de [16, 17, 18, 19, 20] e à revisão de [15].

Assumindo que a demanda total durante um lead time L > 0 é normalmente distribuída com média ÿL e desvio padrão ÿD ÿ L, a abordagem mais simples para dimensionar estoques de segurança para um nível de serviço alvo fixo ÿ é definida como:

$$SS = ÿÿ1(ÿ)ÿD ÿ L \qquad (1)$$

onde ÿ(·) é a função de distribuição cumulativa normal padrão, ÿÿ1(ÿ) é o fator de segurança e ÿD é o desvio padrão da demanda D por unidade de tempo. Se L e D forem considerados variáveis aleatórias independentes, a equação do estoque de segurança (1) pode ser reescrita como:

$$SS = ÿÿ1(ÿ)L \cdot ÿ2_D + (ÿL \cdot D)2 \qquad (2)$$

onde D é a demanda média por unidade de tempo, e ÿL é o desvio padrão para o lead time L. Neste ponto, fica claro que os estoques de segurança são compostos por duas dimensões: a primeira para cobrir a incerteza da demanda e a segunda para lidar com a oferta variabilidade do prazo de entrega.

Uma abordagem substituta para considerar o cálculo dos estoques de segurança para um determinado item como uma função do nível de serviço e dos erros de previsão de demanda do lead time passado é definido como:

$$SS = ÿÿ1(ÿ)ÿF \qquad (3)$$

onde ÿF é o desvio padrão dos erros de previsão para o respectivo lead time L, que por sua vez é tipicamente assumido como determinístico e conhecido. Aqui, o problema central depende da estimativa de ÿF . Para isso, pode-se seguir uma abordagem teórica, na qual uma estimativa de ÿ1 (o desvio padrão dos erros de previsão de demanda cometidos para um período unitário) é fornecida e posteriormente convertida em uma estimativa de ÿF . Por outro lado, abordagens empíricas paramétricas e não paramétricas também podem ser empregadas, onde ÿF é diretamente estimado a partir do erro de previsão do lead time [ver 19, 63, para detalhes]. Quando as distribuições da procura não seguem o pressuposto de normalidade comum, pode-se adotar uma abordagem de previsão não paramétrica para estimar os stocks de segurança:

$$SS = QL(ÿ) \qquad (4)$$

onde QL(ÿ) é o quantil de erro de previsão do lead time no nível de serviço alvo ÿ. Este quantil pode ser obtido, de forma não paramétrica, a partir da distribuição empírica dos erros de previsão do lead time [21].

Outros estudos de investigação foram apresentados para mostrar melhorias científicas nas anteriores formulações estocásticas de forma fechada, quer através de novas formulações de stocks de segurança ou da incorporação de abordagens tradicionais actuais em sistemas de controlo de inventário mais realistas, embora mais complexos. Nosso objetivo é fornecer uma revisão abrangente sobre como o PO tem contribuído para o problema de dimensionamento do estoque de segurança, explorando quais modelos e métodos baseados em PO foram empregados para enfrentá-lo e que tipo de critérios de desempenho foram aplicados em tais abordagens de modelagem.

3. Metodologia e objetivos da investigação

Neste artigo propomos uma SLR [22] para identificar artigos relevantes sobre modelos e métodos baseados em OR para dimensionar estoques de segurança e fornecer insights úteis para futuras pesquisas neste campo. Este tipo de revisão é particularmente útil para lidar com grandes volumes de literatura científica, bem como para reduzir o viés inerente à seleção de estudos de pesquisa [23]. A metodologia de revisão aqui proposta baseia-se nas seguintes etapas: critérios abrangentes de busca e seleção do material; análise descritiva, seleção de categorias; e avaliação de materiais. Essas etapas são profundamente caracterizadas nas seções subsequentes. Em poucas palavras, os principais objetivos desta revisão são:

eu. Compilar e explorar as abordagens e técnicas de modelagem de última geração que foram propostas para dimensionar estoques de segurança;

ii. Compreender quais setores industriais têm sido explorados como domínios de aplicação à segurança ações;

iii. Destacar as desvantagens e limitações das atuais técnicas de dimensionamento do estoque de segurança;

4. Discutir oportunidades de investigação que possam ajudar a orientar futuros investigadores e profissionais interessados no desenvolvimento de novas abordagens baseadas em PO para dimensionar stocks de segurança.

3.1. Busca abrangente do material Com o

objetivo de coletar os artigos mais relevantes para esta pesquisa, o processo de busca foi realizado nas bases de dados acadêmicas Scopus e Web of Science (WoS), nos campos “título, resumo, palavras-chave”. A consulta de pesquisa considera primeiramente as palavras-chave de contexto “estoque de segurança” e “inventário de segurança” em combinação com as palavras-chave mais amplas inventário e estoque, para capturar todas as nomenclaturas possíveis de gerenciamento de estoque (por exemplo, planejamento de estoque/estoque, controle de estoque/estoque), também como acontece com as palavras-chave incerteza/risco incerto* ; variação; variabilidade; volátil; volatilidade; flutuar e flutuar. A utilização do caracter curinga na string de busca incerto* possibilita a identificação de artigos com os termos incerto e incerteza. Finalmente, seguindo a estratégia de busca na literatura de [25], palavras-chave de modelagem mais amplas juntamente com tópicos que, segundo as organizações INFORMS e EURO, caracterizam os métodos OR também foram adicionados à consulta de busca. A pesquisa foi então restrita apenas a revistas científicas revisadas por pares escritas em inglês, já que a maior parte da pesquisa de alta qualidade é normalmente publicada em revistas. Isso resultou em um total de 696 artigos na Scopus e 506 na WoS. Ao final, o número de artigos resultante da exclusão de duplicatas é 813. A Tabela 1 resume o processo de coleta de material.

Tabela 1: Pesquisa abrangente de materiais.

Consulta de pesquisa	(“estoque de segurança” OU “inventário de segurança”) E (estoque OU estoque OU incerto* OU variação OU variabilidade OU volátil OU volatilidade OU flutuante OU flutuação) E (“modelo matemático” OR “método numérico” OR “modelo numérico” OR “ferramenta de decisão” OR “modelo de decisão” OU “análise de decisão” OU simulação OU heurística OU metaheurística OU “meta-heurística” OU otimização OU otimização OU “multiobjetivo” OU multiobjetivo OU “multiatributo” OU multiatributo OU estocástico OU probabilístico OU probabilidade OU programação OU MINLP OU MILP OU MCDM OU “tomada de decisão multicritério” OU MCDA OU “análise de decisão multicritério” OU markov OU filas OU estatísticas OU “redes neurais” OU “análise de dados” OU “sistemas especialistas” OU paramétrico OU “não paramétrico” OU “mineração de dados” OU “análise de dados” OU “aprendizado de máquina” OU “inteligência artificial”)
Intervalo de tempo	Todos os artigos publicados até janeiro de 2020
Tipo de artigo	Somente periódicos acadêmicos revisados por pares
Linguagem	Inglês
Acessos no Scopus	696
Sucessos na Web of Science	506
Acessos excluindo duplicatas 813	

3.2. Critério de seleção

Como forma de excluir artigos que não atendiam ao objetivo desta investigação, todos os 813 documentos foram submetidos a uma análise de digitalização do conteúdo a partir da leitura completa dos resumos. Nesse processo, foram excluídos os trabalhos que não enfocavam o problema de dimensionamento do estoque de segurança de forma quantitativa. Após esse procedimento, foi derivada uma amostra final de 95 artigos de 1977 a 2019. Esse conjunto de artigos serviu de base para as análises apresentadas a seguir.

Para validar o processo de filtragem e os critérios de seleção dos artigos, foi realizada uma análise bibliométrica de palavras-chave baseada em dados de coocorrência nos conjuntos de artigos inicial (813 artigos) e final (95 artigos), utilizando o software VOSviewer [24]. A esquerda e a direita da Figura 1 representam mapas de coocorrência de palavras-chave presentes nos artigos das amostras inicial e final, respectivamente. Em ambos os mapas, quanto maior o círculo de uma palavra-chave, mais frequentemente essa palavra-chave ocorre na respectiva amostra. Além disso, quanto menor a distância entre duas ou mais palavras-chave, maior será o número de coocorrências de tais palavras-chave no mesmo artigo. Um exame mais detalhado das palavras-chave apresentadas na amostra final (à direita da Figura 1) revela que os artigos nela incluídos correspondem ao objetivo deste artigo, no sentido de que palavras-chave centrais como “controle de estoque” e “estoque de segurança” são não excluído durante o processo de refinamento da amostra inicial até a amostra final.
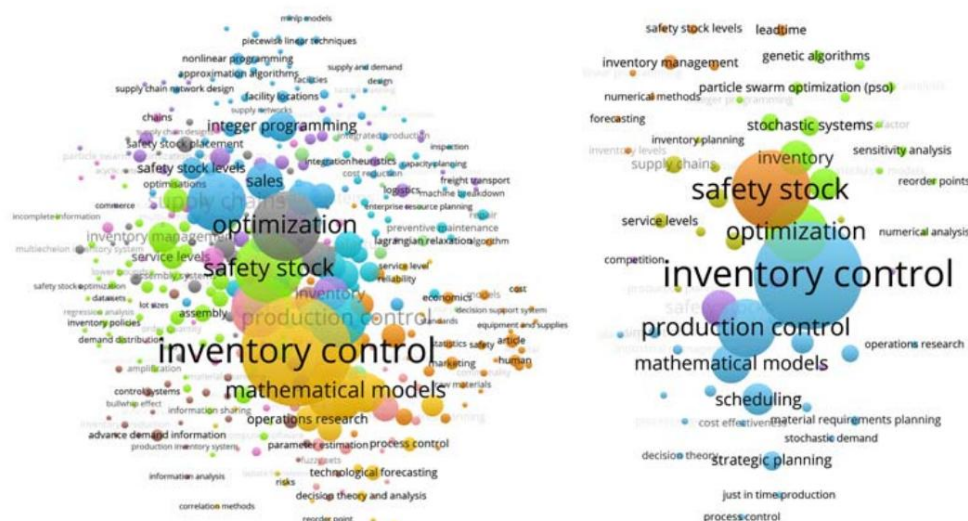
Figura 1: Mapas de coocorrência para palavras-chave de autor e indexadas.

4. Análise descritiva

Os artigos selecionados foram caracterizados descritivamente de acordo com: o número de publicações ao longo do tempo e por periódico internacional revisado por pares; a metodologia de modelagem empregada; e o setor de aplicação. No que diz respeito à evolução do número de artigos publicados entre 1977 e 2019, parece existir uma tendência ascendente ao longo da janela temporal considerada (ver Fig. 2). Particularmente, notamos um aumento significativo no número de artigos publicados a partir do ano de 2005. A Figura 2 também mostra os principais periódicos que publicaram o maior número de artigos contidos em nossa amostra final. O International Journal of Production Economics lista o número máximo de artigos publicados durante a janela de tempo considerada (24 artigos), seguido pelo International Journal of Production Research (10 artigos), o European Journal of Operational Research (9 artigos), o Management Science (5 artigos) e o Planejamento e Controle de Produção ex-aequo com a revista Expert Systems and Applications (4 artigos).
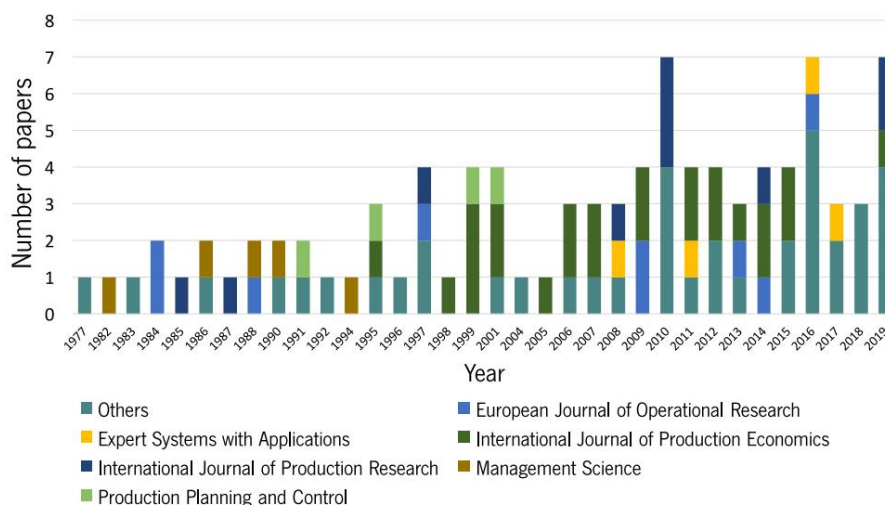
Figura 2: Distribuição dos artigos por periódico internacional revisado por pares de 1977 a 2019.

A Tabela 2 apresenta os dez artigos mais citados até o momento na literatura sobre dimensionamento de estoque de segurança. Aqui, usamos o banco de dados Scopus, pois é o maior banco de dados de resumos e citações de artigos revisados por pares literatura de pesquisa [25]. No entanto, descobrimos que nem todos os artigos listados em nossa amostra apareceram na Scopus. Nestes casos particulares (marcados com ÿ), aproveitamos a base de dados WoS para recolher os número de citações. O artigo mais citado foi publicado por Collier, D. [26] com 171 citações. Este artigo estuda a relação das ações de segurança com o índice de comunalidade componente, um conceito fundamental nos sistemas de planejamento de necessidades de materiais (MRP), também introduzido por Collier, D. [27] no início dos anos 1980.

Tabela 2: Os 10 artigos mais citados na literatura sobre dimensionamento de estoque de segurança.

R	Título	Autor(es)	TC	Diário/ano do
1	Níveis agregados de estoque de segurança e comunalidade de componentes	Collier, D.	171	Ciência da Gestão (1982)
2	Produção em lote com máquina avarias e estoques de segurança	Groenevelt, H., Pintelon, L., Seidmann, A.	113	Pesquisa Operacional (1992)
3	Determinação conjunta de medidas preventivas estoques de manutenção e segurança em um ambiente de produção não confiável	Cheung, K., Hausman W.	104	Logística de Pesquisa Naval (1997)
4	Determinação do estoque de segurança no presença de lead time estocástico e demanda	Eppen, G., Martin, R.	100ÿ	Ciência da Gestão (1988)
5	Programar a produção de vários itens gerais com demandas aleatórias em uma única instalação	Galego, G.	76	Ciência da Gestão (1990)
6	Redução do estoque de segurança por pedido divisão	Kelle, P., Silver, E.	69	Logística de Pesquisa Naval (1990)
7	Programação possibilística no planejamento da produção de ambientes de montagem sob encomenda	Hsu, H., Wang, W.	69	Conjuntos e sistemas difusos (2001)
8	Otimização conjunta de tamanhos de lote, estoques de segurança e prazos de segurança em um sistema MRP	Molinder, A.	67	Revista Internacional de Produção Pesquisa de ção (1997)
9	Planejamento de estoque multiobjetivo usando MOPSO e TOPSIS	Tsou, C.	63	Sistemas Especialistas com Aplicações (2008)
10	Múltiplos compradores e vários fornecedores multi-restrição multi-produto problema da cadeia de suprimentos com demanda estocástica e variável lead-time: Uma busca de harmonia algoritmo	Taleizadeh, A., Niaki S., Barzinpour F.,	62	Matemática Aplicada e Computação (2011)

Nomenclatura: R= Classificação; TC = total de citações; *TC de acordo com banco de dados WoS.

Quanto à distribuição das publicações de acordo com a metodologia de modelagem empregada, descobriram que o problema de dimensionamento de estoques de segurança é frequentemente tratado usando análises/otimização modelos (por exemplo, programação estocástica, dinâmica e de metas; otimização robusta, linear (não linear) programação, programação linear inteira mista (não linear); modelos de simulação (por exemplo, Monte Simulação de Carlo, simulação de eventos discretos); ou modelos híbridos, por meio de otimização baseada em simulação técnicas. Em particular, descobrimos que as abordagens analíticas/de otimização desempenham um papel fundamental na o dimensionamento dos estoques de segurança, na medida em que representam a grande maioria das técnicas utilizadas para esse fim (88%). No que diz respeito às restantes metodologias de modelação, 6% dos artigos abordam

vantagem de abordagens híbridas (otimização baseada em simulação) e outros 6% empregam metodologias de simulação (Fig. 3). Quanto à aplicabilidade prática dos artigos selecionados, constatou-se que em 62 dos 95 artigos (65%) não há referência a estudos de casos reais ou aplicações industriais. Os restantes 33 artigos (35%) consideram estudos de caso em diversos contextos industriais/práticos, com maior concentração nos setores da indústria farmacêutica (6 artigos), automóvel (6 artigos), retalho (3 artigos) e eletrónica (3 artigos). A Seção 5.5 fornece detalhes sobre os estudos baseados em casos que foram explorados ao aplicar métodos OR à determinação de estoques de segurança.
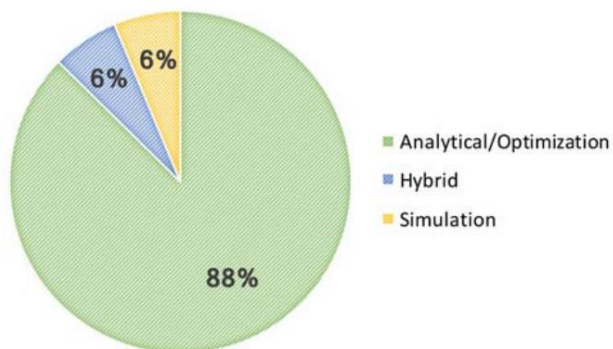
Figura 3: Distribuição dos artigos por abordagem de modelagem.

5. Seleção de categoria e avaliação de material

Com base na categorização apresentada em [83] para o problema de dimensionamento do estoque de segurança, descobrimos que a maioria dos artigos selecionados pode ser caracterizada em quatro categorias distintas:

1. Artigos nos quais as decisões de dimensionamento do estoque de segurança são baseadas na variação da demanda, tipicamente modelada como normalmente distribuída;

2. Artigos nos quais as decisões de dimensionamento do estoque de segurança são baseadas na variação do erros de fundição;

3. Artigos que estudam como a estrutura do produto e a padronização de componentes afetam o problema de dimensionamento do estoque de segurança;

4. Artigos que não seguem, explicitamente, nenhuma das três categorias anteriores, mas acomodam, por exemplo, abordagens de modelagem que não se estabelecem como um todo em parâmetros normalmente distribuídos ou que abrangem fatores de incerteza adicionais além da demanda e da oferta.
   Esta categoria de papéis é doravante denominada “Outros modelos destinados ao dimensionamento de estoques de segurança”.

5.1. Considerando a variação das demandas normalmente distribuídas

Grande parte dos artigos amostrados (35%) considera o dimensionamento dos estoques de segurança com base na variação da demanda. Esta seção concentra-se em artigos que, à luz do teorema do limite central, assumiram demandas normalmente distribuídas nos modelos propostos.

Um dos objetivos primordiais do SCM é manter os níveis de serviço ao cliente. Considerando os estoques de segurança como uma ferramenta para atender a esse propósito, diversos estudos vêm incluindo o nível de serviço como principal critério de desempenho. Kelle [28] discutiu um método exato de solução e uma fórmula aproximada para dimensionar estoques de segurança em contextos com processos aleatórios de entrega e demanda. Mais tarde, Kelle

e Silver [29] estudaram uma estratégia de redução de estoque de segurança explorando a divisão de pedidos. Os autores reconhecem que as decisões sobre a divisão de pedidos podem ser complicadas, exigindo muitas vezes a avaliação de fatores não quantitativos (por exemplo, considerações organizacionais, contratos de fornecedores). Dar-El e Malm-borg [30] desenvolveram um modelo baseado em nível de serviço que considera o reescalonamento de reabastecimento durante o ciclo de estoque. Fazer pedidos mais cedo dentro do ciclo para enfrentar rupturas de estoque constitui a base dessa pesquisa. O modelo proposto permitiu reduzir os custos de manutenção de estoque sem comprometer o nível de serviço. Vargas e Metters [31] propuseram uma estratégia de otimização econômica baseada em uma metodologia de buffer duplo, na qual o primeiro é capaz de fornecer estoques de segurança para uma demanda variável no tempo. Alternativamente, os modelos de simulação também se revelaram eficientes na definição de stocks de segurança dentro dos níveis de serviço alvo. Num ambiente multiproduto com demandas aleatórias, Gallego [32] aproveita um método baseado em simulação de Monte Carlo para derivar estoques de segurança, dada uma política de controle e cronograma cíclico. Da mesma forma, Bahroun e Belgacem [33] adoptaram uma abordagem de Monte Carlo, mas para determinar níveis de segurança dinâmicos para programas de produção cíclicos sob padrões de procura não estacionários. Seus resultados mostraram melhorias no nível de serviço e nos custos em relação às abordagens tradicionais de estoque de segurança constante. No entanto, recordamos um estudo realizado por Benton [34] para sublinhar que, em determinadas situações, pequenas melhorias nos níveis de serviço implicam geralmente um elevado investimento em stocks de segurança. Num tal cenário, a adopção de uma margem de tempo de segurança ao reabastecer os stocks disponíveis deve ser devidamente testada como uma alternativa à abordagem dos stocks de segurança [ver 35].

Apesar de estudos do mundo real já terem comprovado os benefícios, em termos de nível de serviço e custos, da implementação de estratégias de estoque de segurança [36, 37], focar apenas no nível de serviço pode aumentar excessivamente os custos de manutenção, especialmente quando a incerteza sobre a demanda do mercado é alto. Conforme articulado em Jodlbauer e Reitner [38], estabelecer mais estoque de segurança aumenta os custos de manutenção independentemente do tempo de ciclo considerado. Em contraste, níveis mais baixos de stocks de segurança podem levar a rupturas de stock quando a procura é volátil. Este trade-off central entre custos de manutenção e de falta de estoque é investigado por Badinelli [39], que introduz um procedimento de otimização para determinar níveis de estoque de segurança sob padrões estocásticos de demanda. Numa estrutura de inventário de revisão contínua, a abordagem proposta envolve a estimativa de uma função de desvalor (via programação quadrática), um método de otimização para derivar o desempenho de falta de estoque, bem como a determinação de limites na solução ótima. Braglia et al. [40] formularam um novo modelo para otimização de estoque de segurança em uma estrutura SC de fornecedor único e comprador único, na qual o lead time é assumido como controlável e a escassez não é permitida. Nesse trabalho, o nível de serviço é considerado uma função do número de rupturas admissíveis e da quantidade encomendada. Decisões de estoque de segurança em uma estrutura SC semelhante também podem ser encontradas no trabalho de Wangsa e Wee [41]. Contudo, destacamos que SCs complexos raramente operam em ambientes com apenas um fornecedor ou comprador.

Conforme observado anteriormente na seção 2, as formulações dos estoques de segurança também dependem de um fator de segurança estabelecido de acordo com um nível de serviço alvo. Muitos autores têm frequentemente combinado decisões de estoques de segurança, via fator de segurança, com tamanho de lote em problemas de otimização multiobjetivo. Agrell [42], por exemplo, propôs um modelo de tomada de decisão multicritério (MCDM) que considera o tamanho do lote e o fator de estoque de segurança como variáveis de decisão. O modelo foi tratado como um problema de otimização não linear convexo cujo objetivo é triplo: minimizar o custo total anual esperado, o número anual esperado de ocasiões de ruptura de estoque e o número anual esperado de itens em falta. Este problema foi resolvido usando o método interativo de exploração de decisão (IDEM). Funções objetivo muito semelhantes são abordadas na literatura aproveitando-se de técnicas como otimização multiobjetivo semelhante ao eletromagnetismo (MOEMO), otimização multiobjetivo por enxame de partículas (MOPSO), técnica de ordem de preferência por similaridade com a solução ideal (TOPSIS) ou mesmo algoritmos genéticos multiobjetivos (MOGA) [ver 43, 44, 45, 46, 47, 48]. Além disso, métodos baseados em regressão também foram explorados para calcular o fator de segurança. Alstrom [49] determinou-o como uma função da ordem económica, enquanto Hayya et al. [50] consideraram seu cálculo em ambientes de cruzamento de pedidos nos quais a demanda e o lead time são aleatórios.

variáveis.

A determinação do estoque de segurança pode ser particularmente desafiadora na presença de fatores de incerteza [52]. Disney e outros. [53] estudam o efeito dos lead times estocásticos com cruzamento de pedidos no dimensionamento dos estoques de segurança. Os autores derivam um método para determinar os níveis exatos de segurança para uma generalização linear da política de controle de estoque do pedido até o fim. Para lidar com as incertezas causadas pela demanda estocástica e diferentes tipos de aleatoriedade de rendimento, Inderfurth e Vogelgesang [54] propuseram abordagens de forma fechada para determinar estoques de segurança dinâmicos e discutiram maneiras de converter esses níveis dinâmicos em estáticos, mais fáceis de serem aplicados. em contextos práticos. Curiosamente, no contexto de sistemas de controlo MRP com incerteza na procura e na oferta, Inderfurth [55] mostrou que os níveis de stock de segurança não devem necessariamente aumentar de forma linear no que diz respeito ao risco de rendimento. Fatores de incerteza semelhantes foram investigados por Lu et al. [56], que desenvolveram um método geral de estoque de segurança que leva em conta a demanda estocástica não estacionária e o rendimento aleatório da oferta. O método proposto pode ser descrito em três fases principais. Primeiro, o estoque base é expresso considerando a taxa de rendimento da oferta como uma variável aleatória para formular uma equação de balanço de estoques.

Em segundo lugar, os fluxos de entrada e saída de materiais em estoque são modelados por uma variável aleatória de cobertura. Por último, o estoque de segurança é calculado através do método de iteração de ponto fixo sob uma determinada probabilidade de não ruptura de estoque. Neste ponto, outra observação que fizemos é que, apesar da evidente influência dos fatores de incerteza na gestão de estoques, muito pouca atenção tem sido dada à aplicabilidade de estratégias de estoque de segurança ao longo dos diferentes estágios do ciclo de vida de um produto (introdução, crescimento, maturidade e declínio), que estão naturalmente sujeitos a diferentes níveis de incerteza. Uma exceção é o trabalho de Hsueh [57], que estuda políticas de controle de estoque e expressões fechadas para o estoque de segurança ideal em todos os estágios do ciclo de vida do produto. Outro aspecto muito importante é que estimativas precisas do estoque de segurança devem levar em conta as demandas autocorrelacionadas [58] e os problemas de qualidade dos dados. Em relação a este último, o trabalho de Kumar e Evers [59] é, até onde sabemos, um dos poucos trabalhos que cobre esse tópico ao propor um método computacionalmente eficiente que leva em conta a qualidade dos dados e a correlação entre demanda e lead time em para calcular a variação da demanda do lead time com mais precisão. Ao suavizar o efeito de amostras discrepantes, o método proposto revela-se útil em mercados voláteis.

No geral, as nossas conclusões mostraram que o problema do dimensionamento dos stocks de segurança sob exigências de produtos normalmente distribuídas tem sido intensamente explorado, utilizando vários tipos de modelos OR, técnicas de modelação e critérios de desempenho, conforme resumido na Tabela 3. Reconhecemos ainda que o custo total é o mais importante. critério de desempenho amplamente utilizado. No entanto, notamos que os custos realistas de SC, em particular os custos de escassez e de manutenção, são muito difíceis de serem medidos na prática [35].
Além disso, enfatizamos que o uso da distribuição gaussiana para modelar a demanda pode ser fundamentalmente falho em contextos SC do mundo real [60, 10, 61]. Mais pesquisas sobre este assunto são necessárias.

5.2. Considerando a variação dos erros de previsão Outra abordagem

bem conhecida para dimensionar os estoques de segurança baseia-se na suposição de que eles são proporcionais aos erros de previsão [83]. Dado que os stocks de segurança funcionam como uma estratégia de protecção contra imprecisões nas previsões, se a procura for correctamente prevista, os stocks de segurança exigidos são mais baixos, tal como os níveis de incerteza. No entanto, conseguir estimativas precisas do desvio padrão dos erros de previsão continua a ser um desafio.

Um trabalho seminal sobre este tema foi proposto por Eppen e Martin [60], que utilizaram a variância dos erros de previsão durante o lead time de demanda para definir estoques de segurança, levando em consideração técnicas de suavização exponencial e teoria da probabilidade. Os autores mostraram que a prática geral de assumir distribuições normais para a demanda por lead time pode ser enganosa nas decisões sobre estoques de segurança. Aqui, o uso de abordagens não paramétricas de densidade de kernel parece ser promissor para evitar a suposição tão comum de erros de previsão normais e iid [ver 21, 63]. Além disso, descobrimos que muitos autores assumiram prazos de entrega normalmente distribuídos que, em certos casos,

Tabela 3: Uma visão geral da literatura sobre abordagens de modelagem para dimensionamento de estoques de segurança com base na variação da demanda.

Referências	Método OR/Técnica(s) de modelagem	Principais critérios de desempenho
Agrell [42]	Análise de decisão/PNL convexa	1. Custos de manutenção; 2. Frequência de curta idade; 3. Roturas de estoque
Alstrom [49]	Estatística/Regressão; Heurística	1. Custos de detenção e encomenda; 2. Frequência de escassez.
Badinelli [39]	Otimização/programação quadrática	1. Custos de manutenção, pedido e falta de estoque
Bahroun e Belgacem [33]	Simulação/Monte Carlo	1. Nível de serviço; 2. Custos de retenção
Benton [34]	Simulação	1. Nível de serviço
Braglia et al. [40]	Otimização/PV; Algoritmos de minimização exatos e aproximados	1. Custos totais (incluindo pedido, configuração, custos de transporte e retenção)
Brander e Forsberg [51]	Teoria Analítica/Inventário; Abordagem do período básico	1. Custos de manutenção e configuração
Charnes et al. [58]	Teoria analítica/inventário	1. Probabilidade de ruptura de estoque
Cheng et al. [46]	Otimização/MOPSO	1. Custos de detenção e encomenda; 2. Frequência de escassez.
Dar-El e Malmborg [30]	Teoria analítica/inventário	1. Nível de serviço; 2. Custos de retenção
Disney e outros. [53]	Teoria analítica/inventário	1. Custos de manutenção e backlog; 2. Disponibilidade
Galego [32]	Teoria de Otimização/Controle; Método de pesquisa baseado em simulação	1. Custos de retenção, pedidos em espera e configuração
Hayya et al. [50]	Estatísticas/Regressão	1. Custos de retenção, pedido e escassez
Hsueh [57]	Expressões analíticas/de formato fechado	1. Custos de retenção e pedidos de fabricação
Inderfurth [55]	Teoria Analítica/Inventário; Teoria de controle	1. Custos de retenção, escassez e produção
Inderfurth e Vo-gelgesang [54]	Teoria Analítica/Inventário; Teoria de controle	1. Custos de retenção e backlog
Jodlbauer e Reitner [38]	Otimização/método 2D-Newton	1. Nível de serviço; 2. Segurando, custos de configuração e pedidos pendentes
Jonsson e Mattsson [35]	Simulação/DES	1. Nível de serviço; 2. Custos de encomenda
Kelle [28]	Teoria analítica/inventário	1. Nível de serviço
Kelle e Prata [29]	Teoria analítica/inventário	1. Nível de serviço
Kumar e Evers [59]	Teoria analítica/inventário	1. Variância (estimada/simulada)
Lu et al. [56]	Teoria Analítica/Inventário; Método de iteração de ponto fixo	1. Nível de serviço; 2. Níveis de estoque
Man-Yi e Xiao-Wo [52]	Estatística/Credibilidade e Teoria Fuzzy	1. Taxa de preenchimento
Mertins e Lewandrowski [62]	Teoria analítica/inventário	1. Custos de estoque
Ozbay e Ozguven [36, 37]	Otimização/PVB; pLEPs	1. Custos totais (incluindo armazenamento, excedentes, escassez e custos de ajuste)
Srivastav e Agrawal [47]	Otimização/MOGA e MOPSO	1. Custos de pedido, retenção e pedidos pendentes; 2. Frequência de escassez; 3. Roturas de stock;
Srivastav e Agrawal [48], Tsu [44]	Otimização/MOPSO	1. Custos de encomenda/detenção; 2. Frequência de curta idade; 3. Roturas de estoque
Tsu [45]	Otimização/MOEMO e MOPSO	1. Custos de encomenda/detenção; 2. Frequência de curta idade; 3. Roturas de estoque
Tsou e Kao [43]	Otimização/MOEMO	1. Custos de encomenda/detenção; 2. Frequência de curta idade; 3. Roturas de estoque
Wangsa e Wee [41]	Otimização/Heurística	1. Custos totais (incluindo custos de pedido, manutenção, falta, configuração e frete/transporte)
Vargas e Metros [31]	Otimização/DEA; Teoria do inventário	1. Taxa de preenchimento; 2. Custos de manutenção e configuração

Nomenclatura: PNL: Programação Não Linear; VP: Valor Presente; DES: Simulação de Eventos Discretos; MOPSO: Otimização Multiobjetivo por Enxame de Partículas; PVB: algoritmo Pr´ekopa-Vizvari-Badics; pLEPs: método de pontos eficientes em nível p; MOGA: Algoritmo Genético Multiobjetivo; MOEMO: Otimização Multiobjetivo tipo Eletromagnetismo; DEA: Dados Análise Envoltória.

também não tem relação com a realidade. Uma exceção notável é o trabalho de Fotopoulos et al. [64], que propuseram um novo método para derivar um limite superior do estoque de segurança quando as demandas são autocorrelacionadas e os prazos de entrega não seguem uma distribuição gaussiana, mas sim arbitrária. Para tanto, são exploradas as desigualdades e a teoria dos momentos de Chebychev. Os autores também enfatizaram que a autocorrelação da demanda não deve ser negligenciada nas decisões sobre estoques de segurança, conforme apontado em outros estudos [58, 65].

Como o dimensionamento dos estoques de segurança é tipicamente um problema que envolve a otimização de uma função de custo, vários modelos matemáticos de otimização diferentes foram propostos. Com o objetivo de minimizar o custo total do sistema, Buffa [66] formulou um problema de programação de metas, em combinação com um modelo de previsão de demanda, para determinar estoques de segurança em um ambiente multiproduto, sujeito a restrições relacionadas à disponibilidade de recursos. . Potamianos et al. [67] usaram programação dinâmica para introduzir um novo método interativo de estoque de segurança que leva em conta a precisão das previsões de demanda. A abordagem proposta foi projetada para ser adicionada a um algoritmo modificado de Wagner-Whitin, e também para definir estoques de segurança por meio de interações pela gestão. Reichhart et al. [68] desenvolveram uma fórmula nova e precisa de estoque de segurança para produtos multivariantes e sistemas responsivos, por meio de um processo de simulação de Monte Carlo. Um termo ajustado para o desvio padrão dos erros de previsão está incluído na sua formulação. Hsu e Wang [69] propuseram um modelo de programação linear de possibilidade que engloba ajustes de previsão e incerteza de demanda no cálculo dos estoques de segurança. Em ambientes de montagem sob encomenda (ATO), seu trabalho apresentou um dos primeiros modelos para lidar com dados imprecisos em problemas de tomada de decisão envolvendo estoque de segurança como variável de decisão. Vários outros métodos foram desenvolvidos para dimensionar estoques de segurança de acordo com o ambiente de controle de produção [70, 71, 72]. Reconhecemos, no entanto, que, independentemente do ambiente de produção, a geração de previsões de procura precisas é especialmente desafiadora quando fatores exógenos não são considerados no processo de previsão. Um estudo interessante que levanta conhecimentos relevantes sobre este assunto foi proposto por Beutel e Minner [73], que estudaram uma estrutura baseada em dados para estabelecer stocks de segurança. Numa primeira etapa, foram empregados métodos de regressão para prever a demanda. Os erros de estimativa são então usados para definir os estoques de segurança desejados.

Numa segunda etapa, estuda-se uma abordagem de programação linear para minimizar uma função objetivo de custo sujeita a uma restrição de nível de serviço. Uma das novidades aqui diz respeito à inclusão de factores externos que possam ter influência na estimativa da procura (por exemplo, dinâmica de preços e condições meteorológicas). Esta inclusão é particularmente relevante porque permite superar as desvantagens dos modelos tradicionais de séries temporais univariadas que desconsideram estes fatores.

Dos trabalhos acima referidos, pode concluir-se que os stocks de segurança constantes podem não ser a abordagem mais adequada para fazer face a padrões erráticos de procura. Para superar esta desvantagem, os estoques de segurança faseados no tempo foram estudados por Kanet et al. [74], que propuseram um modelo de programação linear capaz de minimizar os níveis de estoque para um conjunto específico de metas de estoque de segurança. Utilizando dados reais da indústria dos EUA como suporte, descobriu-se que a adoção de stocks de segurança faseados no tempo conduz a poupanças de custos significativas em relação à estratégia tradicional de stocks de segurança constantes. Helber et al. [75] apresentaram um problema estocástico de dimensionamento de lotes capacitado (SCLSP) onde sua solução serve de base para a determinação de estoques de segurança dinâmicos coordenados com as quantidades de produção. No entanto, destacamos que as decisões de estoque de segurança com boa relação custo-benefício devem ser adicionalmente coordenadas com as estratégias de terceirização definidas com os fornecedores. Na verdade, em certas situações, pode ser apropriado estabelecer acordos de longo prazo com fornecedores dispendiosos e estabelecer níveis mais baixos de stock de segurança, em vez de utilizar vários fornecedores de baixo custo e níveis de segurança elevados [76]. Por outro lado, tais decisões também devem abranger o intervalo de tempo durante o qual não são permitidas alterações no plano (também conhecido como período congelado) [77], a fim de evitar a geração de planos de produção instáveis tanto para o(s) cliente(s) como para o(s) fornecedor(es).).

A Tabela 4 fornece uma caracterização geral dos artigos incluídos nesta subseção. Aqui, descobrimos que apenas 6 dos 17 estudos incluídos nesta categoria relataram estudos de caso do mundo real [ver 66, 67, 74, 73, 63, 21], sugerindo que são necessárias mais pesquisas com validações empíricas.

Tabela 4: Uma visão geral da literatura sobre abordagens de modelagem para dimensionar estoques de segurança com base na variação de os erros de previsão.

Referências	Método OR/Técnica(s) de modelagem	Principais critérios de desempenho
Abdel-Malek et al. [76]	Cadeias analíticas/de Markov; Teoria das filas	1. Custos totais
Beutel e Minner [73]	Estatisticas; Otimização/Regressão; LP	1. Nível de serviço; 2. Segurando e custos de penalidade de escassez
Boute et al. [65]	Cadeias analíticas/de Markov; Métodos analíticos matriciais	1. Taxa de preenchimento
Bufa [66]	Otimização/GP	1. Custos de manutenção, ruptura de estoque e aquisição de recursos
Campbell [71]	Teoria analítica/inventário	1. Custos totais; 2. Nível de serviço
Eppen e Martin [60]	Teoria analítica/de inventário; As desigualdades de Cheby-chev	1. Probabilidade de ruptura de estoque
Fotopoulos et al. [64]	Desigualdades analíticas/Chebychev; Teoria dos momentos	N / D
Helber et al. [75]	Otimização/MILP; Por partes aproximações lineares	1. Nível de serviço; 2. Segurando, horas extras e custos de configuração
Hsu e Wang [69]	Otimização/PLP; Zimmermann programação difusa	1. Falta de estoque, retenção e inatividade custos de penalidade de capacidade
Kanet et al. [74]	Otimização/LP	1. Frequência de escassez; 2. Taxa de preenchimento
Lian et al. [77]	Otimização/Heurística	1. Custos de manutenção/aceleração, pedido e configuração
Potamianos et al. [67]	Otimização/DP	1. Custos de produção, manutenção e configuração
Reichhart et al. [68]	Estatisticas; Simulação/Regressão; Monte Carlo	1. Nível de serviço; 2. Inventário, custos de produção e pedidos em espera
Trapero et al. [63, 21]	Modelos analíticos/GARCH; Estimativa de densidade do kernel	1. Custos de estoque (estoque insuficiente e excesso de estoque); 2. Nível de serviço
Wacker [70]	Estatísticas/Regressão	1. Eficiência estatística
Zhao et al. [72]	Simulação	1. Nível de serviço; 2. Configuração de produção, manutenção e ruptura de estoque custos; 3. Instabilidade de cronograma

Nomenclatura: LP: Programação Linear; GP: Programação de Metas; MILP: Programação Linear Inteira Mista; PLP: Programação Linear de Possibilidade; DP: Programação Dinâmica; GARCH: AutoRegressivo Generalizado Heterocedástico Condicional; N/A: Não disponível.

5.3. Considerando a estrutura do produto e a padronização de componentes

Muito poucos pesquisadores prestaram atenção ao estudo da maneira como a estrutura e os componentes do produto a padronização pode afetar as decisões sobre estoques de segurança. Na verdade, apenas 7 artigos (7% da amostra total) estão incluídos nesta categoria. A Tabela 5 resume algumas abordagens representativas sobre este assunto.

Carlson e Yano [78] propuseram uma solução heurística de limite superior para estabelecer estoques de segurança para cada componente em uma estrutura de produto com cronogramas de produção periódicos e replanejados, sob demandas estocásticas. Simulações numéricas mostraram que a abordagem proposta resultou em economia de até 20% dos custos totais em comparação com os custos derivados da não adoção de estoque de segurança medidas. Posteriormente, os mesmos autores estudaram como a frequência de reprogramação afeta os estoques de segurança decisões para um único produto e sua estrutura de produto em contextos MRP [79]. Como resultado, o fixo a política de agendamento revelou-se a escolha mais económica. Ainda em contextos MRP, Grubbstr¨om [80] discutiram o dimensionamento de níveis ótimos de estoque de segurança em um ambiente de nível único, usando Transformações de Laplace e tendo em conta o fluxo de anuidades como principal critério de desempenho,

em detrimento da abordagem do custo médio. Este artigo foi posteriormente generalizado em Grubbstr¨om [81] para sistemas de estrutura de produtos multinível, via análise de entrada-saída. Em qualquer caso, independentemente da estrutura do produto e do ambiente de produção, níveis de segurança adequados devem levar a baixos índices de falta de estoque/custo de manutenção [82, 83].

Em casos extremos, na presença de rupturas de matéria-prima, a fabricação de vários produtos finais pode ser comprometida. Esta situação pode ser facilmente agravada na presença de estruturas de produtos nas quais um componente é comum a vários produtos finais (comunalidade de componentes). Collier [26] propôs uma fórmula explícita para o cálculo de estoques de segurança que considera uma métrica analítica, baseada na lista de materiais (BOM), para medir o grau de comunalidade na linha de produtos de uma empresa. Essa formulação foi avaliada através de simulação em contextos em que prevalecem fenómenos de incerteza. Os resultados sugeriram que o aumento do grau de comunalidade dos componentes resulta em menores estoques de segurança, independentemente do nível de serviço constante imposto. É digno de nota que as conclusões derivadas do modelo de Collier são particularmente significativas na prática se a minimização dos custos de detenção for considerada uma preocupação principal.

Tabela 5: Uma visão geral da literatura sobre abordagens de modelagem para dimensionar estoques de segurança com base na estrutura do produto e na padronização de componentes.

Referências	Método OR/Técnica(s) de modelagem	Principais critérios de desempenho
Collier [26]	Desigualdades analíticas/Chebychev	1. Nível de serviço; 2. Custos de manutenção e configuração
Carlson e Yano [78]	Otimização/Heurística	1. Custos de manutenção e configuração
Grubbström [80, 81]	Transformada analítica/Laplace; Análise de entrada-saída	1. Fluxo de anuidade
Molinder [82]	Recozimento Meta-heurístico/Simulado	1. Retenção, estoque e configuração custos; 2. Nível de ruptura de estoque
Pessoa et al. [83]	Teoria analítica/inventário	1. Nível de serviço; 2. Custos de manutenção e escassez
Yano e Carlson [79]	Simulação	1. Nível de serviço; 2. Configuração de produção/ pedido e custos de manutenção

5.4. Outros modelos projetados para dimensionar estoques de segurança

Conforme discutido nas seções anteriores, muitos modelos e métodos de PO foram propostos para definir estoques de segurança em diferentes ambientes de produção. Contudo, encontramos outros modelos concebidos para dimensionar estoques de segurança que não seguem explicitamente nenhuma das três categorias anteriores e, principalmente, não se acomodam como um todo em parâmetros normalmente distribuídos. Para facilitar a exposição, agrupamos os estudos incluídos nesta categoria de acordo com a natureza da abordagem de modelagem OR empregada (ver Tabela 6). Esses estudos são revisados a seguir.

5.4.1. Modelos estocásticos

Os modelos estocásticos para dimensionamento de estoques de segurança estão firmemente fundamentados na probabilidade e na teoria estatística aplicada à gestão de estoques, incluindo a teoria das filas e as cadeias de Markov. Van Donselaar e Broekmeulen [99] determinaram estoques de segurança em um sistema de controle de estoque de revisão periódica de vendas perdidas com demandas estocásticas discretas. A regressão linear foi empregada para propor aproximações rápidas para a taxa de preenchimento. No caso de padrões de procura intermitente, Zhou e Viswanathan [97] propõem um método de bootstrapping para gerar uma estimativa da variação da procura no período de tempo e calcular os stocks de segurança necessários para atingir os níveis de serviço alvo. O método proposto teve melhor desempenho para dados de demanda gerados aleatoriamente e alto volume de dados.
No entanto, ao testar o modelo proposto com um conjunto real de dados industriais do setor aeroespacial, o método de bootstrapping teve um desempenho pior do que os métodos paramétricos.

Os estudos de Hayya e Harrison [96] e Cáceres et al. [103] oferecem uma perspectiva interessante sobre como considerar o efeito dos cruzamentos na determinação dos estoques de segurança quando a demanda

Tabela 6: Resumo das pesquisas classificadas como "Outros modelos projetados para dimensionamento de estoques de segurança" com base em diferentes abordagens de modelagem de OR.

Abordagem de modelagem	Estudos de pesquisa
Estocástico	Van Ness e Stevenson [84]; Van der Veen [85]; Groenevelt et al. [86]; Glasserman [87]; Cheung e Hausman [88]; Hung e Chang [89]; Dohi et al. [90]; Martinelli e Valigi [91]; Gharbi et al. [92]; Wang et al. [93]; Sarkar et al. [94]; Sana e Chaudhuri [95]; Ruiz-Torres e Mahmoodi [61]; Hayya e Harrison [96]; Zhou e Viswanathan [97]; Chakraborty e Giri [98]; Van Donselaar e Broekmeulen [99]; Chaturvedi e Martínez-de-Alb'eniz [100]; Manzini et al. [101]; Huang et al. [102]; Cáceres et al. [103]; Altendorf [104]
Programação Matemática	Bourland e Yano [105]; Maia e Qassim [106]; Louly e Dolgui [107]; Teimory et al. [108]; Janssens e Ramaekers [109]; Taleizadeh et al. [110]; Rapold e Yono [111]; Keskin et al. [112]; Rafiei et al. [113]; Ben-Ammar et al. [114]
Otimização baseada em simulação	Bouslah et al. [115]; Gansterer et al. [116]; Avci e Selim [117, 118]; Benbitour et al. [119]
Redes neurais	Zhang et al. [120]

e os prazos de entrega estão correlacionados. No entanto, o primeiro estudo não teve em conta a procura não determinística e o segundo não operou sob um sistema de inventário multiproduto. Da mesma forma, Wang et al. [93] discutiram o problema de calcular estoques de segurança ótimos quando a demanda e os prazos de entrega estão correlacionados, mas o método proposto não considera cruzamentos. Os autores derivam equações robustas para determinar a média e a variância da demanda por lead time usando diferentes formas distributivas de demanda e lead time. Neste ponto, observe que o estoque de segurança é, por definição, o ponto de reabastecimento menos a demanda esperada no lead time. Assim, o problema de determinação do ponto de reabastecimento pode ser igualmente entendido como a determinação do estoque de segurança [84]. A título de exemplo, Ruiz-Torres e Mahmoodi [61] estudaram um método de ponto de reabastecimento de valor esperado para determinar os níveis de estoque de segurança sem considerar as suposições comuns relacionadas à adoção de demanda de lead time normalmente distribuída. O seu trabalho destaca a necessidade de uma gestão proactiva dos stocks de segurança em ambientes caracterizados por exigências voláteis ou estáveis.

Em algumas situações, a variabilidade da procura e da oferta também induz fatores de incerteza adicionais nos sistemas gerais de produção, nomeadamente relacionados com a capacidade e os processos de produção, que afetam diretamente as decisões sobre stocks de segurança. Sistemas de produção não confiáveis com quebras de máquinas também estão incluídos neste contexto. Chaturvedi e Mart´ÿnez-de-Alb´eniz [100] argumentaram que as decisões sobre capacidade e estoque de segurança deveriam ser otimizadas em conjunto. Seus resultados mostram que os níveis de capacidade de resposta do fabricante à incerteza do fornecimento aumentam sempre que o estoque de segurança e a capacidade aumentam. Huang et al. [102] estudaram a combinação entre a capacidade de aumentar a produção (capacidade reativa) e os estoques de segurança para enfrentar demandas inesperadas, minimizando custos de longo prazo e mantendo um nível de serviço adequado. Glasserman [87] e Altendorfer [104] também abordaram o problema de estabelecer estoques de segurança em sistemas de estoque com restrições de capacidade de produção. Nos estudos seminais de Hung e Chang [89] e Cheung e Hausman [88], são conduzidos trabalhos iniciais relativos à determinação de estoques de segurança em ambientes de fabricação incertos. O primeiro estudo propôs um método de estimativa de estoque de segurança para suavizar as incertezas relacionadas à variabilidade dos tempos de fluxo e das taxas de rendimento em ambientes disponíveis para promessas. Aqui, os níveis de segurança são apresentados como uma função linear da taxa de produção e podem ser determinados de acordo com uma determinada especificação de entrega no prazo. Neste último estudo, os autores contabilizam o trade-off entre o investimento em planos de manutenção preventiva para reduzir a taxa de falhas das máquinas e o estabelecimento de estoques de segurança para fazer frente à demanda em caso de quebras das máquinas. Em suma, ambos os trabalhos comprovaram que os stocks de segurança e a manutenção preventiva não devem ser
Mais tarde, Dohi et al. [90] estendeu o trabalho de Cheung e Hausman [88] desenvolvendo um romance

modelo estocástico com quebras aleatórias de máquinas para obter a quantidade de fabricação e os estoques de segurança necessários que minimizem os custos esperados por unidade de tempo. Outras variantes de modelos interessantes para o problema de dimensionamento de estoques de segurança em sistemas de fabricação não confiáveis podem ser encontradas em [86, 91, 92, 95, 94, 98].

5.4.2. Modelos de programação matemática

Bourland e Yano [105] introduziram explicitamente, pela primeira vez, estoques de segurança juntamente com tempo ocioso e horas extras em um problema econômico estocástico de programação de lotes. Na abordagem proposta é apresentado um programa matemático não linear para determinar os níveis de segurança necessários para evitar, quando possível, o uso de horas extras na produção. Maia e Qassim [106] formularam um modelo de otimização não linear que incorpora o desempenho de entrega dos fornecedores no cálculo dos estoques de segurança, com o objetivo de minimizar a soma dos custos de estoque e de oportunidade. Foi demonstrado que os estoques de segurança não devem ser considerados sempre que os custos de oportunidade forem baixos. Por outro lado, os stocks de segurança revelaram-se uma estratégia razoável para mitigar eventos de ruptura de stock quando os custos de oportunidade aumentam. Louly e Dolgui [107] desenvolveram uma nova abordagem de otimização juntamente com um algoritmo branch and bind eficiente para calcular níveis de segurança para componentes sob prazos de aquisição aleatórios. O modelo proposto mantém qualquer probabilidade de distribuição discreta e revela-se aplicável em diversos domínios. Taleizadeh et al. [110] estudaram um problema de cadeia de suprimentos multicomprador e multifornecedor sob restrições orçamentárias relacionadas à aquisição dos produtos pelo comprador, bem como à limitação de espaço no fornecedor. O estoque de segurança é formulado como uma variável de decisão do modelo proposto que, por sua vez, é tratado como um problema de programação não linear inteira e resolvido através de um algoritmo de busca de harmonia. Janssens e Ramaekers [109] formularam um modelo de programação linear para estabelecer estoques de segurança sob informações incompletas sobre a distribuição da demanda.

Rappold e Yono [111] propuseram uma abordagem de modelagem estocástica que pode ser usada para fornecer os estoques de segurança necessários para estabilizar os ciclos de produção, ao mesmo tempo que protege contra a incerteza da demanda e minimiza os custos de manutenção e de pedidos pendentes.

Observamos, no entanto, que embora vários modelos de programação matemática tenham sido propostos e aplicados com sucesso a estudos de caso do mundo real (relatando a utilidade das estratégias de estoque de segurança não apenas na melhoria dos níveis de serviço [113], mas também na otimização da produção, das quantidades de estoque e pedidos em atraso [108, 112]) os prazos de entrega planejados ideais podem ser preferíveis aos estoques de segurança em certas situações [114].

5.4.3. Modelos de otimização baseados em simulação

No passado, a simulação e a otimização eram normalmente consideradas como duas abordagens distintas de pesquisa operacional. No entanto, os rápidos desenvolvimentos nas capacidades computacionais desencadearam o uso dessas duas abordagens de forma combinada [121]. Muitas vezes, essa combinação frutífera é usada para: (i) otimizar as entradas do modelo, (ii) calcular parâmetros do modelo ou (iii) amostragem de cenários para modelos de programação matemática.

Bouslah et al. [115] aproximaram os parâmetros ótimos de controle de um modelo integrado de dimensionamento de lotes e uma política de controle de feedback através de uma abordagem experimental baseada em simulação, com recurso à metodologia de superfície de resposta. A abordagem proposta determina conjuntamente a quantidade económica de produção, o nível óptimo de stock de segurança e o plano de amostragem económica, minimizando ao mesmo tempo os custos globais esperados. Gansterer et al. [116] propuseram uma estrutura de otimização de simulação para o planejamento hierárquico da produção, na qual o lead time planejado, o estoque de segurança e o tamanho do lote são otimizados. Curiosamente, os autores demonstraram que, sob certos pressupostos de modelização, os stocks de segurança não necessitam necessariamente de ser aumentados quando a volatilidade da procura é elevada.

Com o objetivo de reagir a falhas de fornecimento, as empresas recorrem frequentemente a fretes premium, ou entregas urgentes [119], para garantir a disponibilidade do produto em níveis de serviço adequados. Neste contexto, Avci e Selim [117] introduziram recentemente um algoritmo de evolução diferencial multiobjetivo baseado em decomposição (MODE/D) para otimização de estoque que opera em um sistema baseado em simulação.

moda de otimização. Particularmente, na fase de simulação, os estoques de segurança são avaliados em termos de custo de manutenção e taxa de frete premium. Em seguida, na fase de otimização, os resultados da simulação são utilizados para gerar novos níveis de estoque de segurança. Este trabalho foi ainda generalizado em Avci e Selim [118] para considerar as incertezas de oferta e procura em cadeias de abastecimento convergentes.

5.4.4. Modelos de redes neurais

A inteligência artificial (IA) surgiu como uma técnica poderosa que, baseada em sistemas auxiliados por computador, permite generalizar a partir de exemplos de treinamento. Como uma técnica proeminente de IA, os modelos de redes neurais têm sido frequentemente aplicados em problemas de tomada de decisão em diferentes contextos de SC, incluindo previsão de séries temporais [122], seleção de fornecedores [123] e logística inteligente [124], para citar alguns.
Recentemente, um estudo proposto por Zhang et al. [120] usaram uma rede neural de retropropagação para estimar os níveis de estoque de segurança. Os autores consideraram a frequência de venda, os custos de armazenamento/escassez, a demanda e a quantidade de compra como características do modelo que podem influenciar no dimensionamento dos estoques de segurança. No entanto, se os valores do stock de segurança utilizados como instâncias de formação não forem óptimos no sentido de minimizar os custos de inventário e ao mesmo tempo maximizar o nível de serviço, os stocks de segurança previstos também podem não ser óptimos. Em qualquer caso, dado que os modelos de IA têm o potencial de encontrar padrões de características interessantes em grandes quantidades de dados, inúmeras oportunidades de investigação poderão surgir nesta área, particularmente aquelas relacionadas com a melhoria da previsão da procura de SC.

5.5. Aplicações industriais e estudos de caso do mundo real Nesta

seção, concentramos nossa atenção nos artigos pesquisados que consideram aplicações industriais do mundo real em suas abordagens de modelagem. Concretamente, 33 (de 95) artigos utilizaram estudos de caso para demonstrar a relevância prática das suas abordagens de modelização.

A Tabela 7 fornece a classificação dos artigos de estudo de caso de acordo com a categorização introduzida na seção 5 e o tipo de produto e incertezas consideradas. Os setores farmacêutico e automotivo dominam as aplicações industriais. No entanto, com exceção de Cheng et al. [46], descobrimos que todos os artigos com aplicações à indústria farmacêutica geralmente assumem topologias de cadeia de suprimentos operando com um único produto, o que torna difícil avaliar a escalabilidade dos modelos propostos para ambientes multiprodutos. Em contraste, 60% dos artigos que fornecem evidências empíricas da indústria automóvel consideram modelos multiprodutos, que são muito mais realistas. Como exemplos, Benbitour et al. [119] mostram que as economias de custos realizadas usando um modelo de controle de estoque ATO com considerações de estoque de segurança podem chegar a 66%. Por outro lado, Kanet et al. [74] exploram o conceito de estoques de segurança faseados no tempo e relatam uma economia de estoque de segurança de 14% em comparação com a solução obtida pela política de estoque de segurança constante. Outra observação relevante dos resultados apresentados na Tabela 7 é que poucos trabalhos foram realizados para compreender plenamente a importância dos stocks de segurança no domínio da logística humanitária. Isto torna-se particularmente valioso numa altura em que os desastres naturais, as catástrofes e as infecções virais pandémicas aumentam continuamente. Neste ponto, Ozguven e Ozbay [37] é o único artigo pesquisado que, aproveitando informações reais sobre o furacão Katrina em Nova Orleans, EUA, estuda estoques de segurança ideais de estoques de emergência para evitar interrupções. É necessária mais investigação para criar uma melhor base para a avaliação do verdadeiro potencial das existências de segurança neste domínio.

Tabela 7: Detalhes de estudos de caso na literatura sobre dimensionamento de estoque de segurança.

Referências	Estudo de caso	Tipo de categoria de papel	Modelo	Tipo de produto		Tipo de incerteza			Principais resultados
				Prazo de entrega de demanda múltipla única Outro					
Agrell [42]	Indústria farmacêutica	DC	A/O		-		-	-	Sistema interativo de apoio à decisão para controle de estoque multicritério
Altendorf [104]	Indústria de fabricação de colchões infantis	Ó	A/O –				-	-	A taxa de pedidos específicos do item provou ser um fator crítico que afeta os estoques de segurança ideais
Avci e Selim [117]	Indústria automotiva, Europa	Ó	H		-			-	Estrutura de otimização de simulação para determinar estoques de segurança ideais e flexibilidade do fornecedor em topologias divergentes da cadeia de suprimentos
Avci e Selim [118]	Indústria automotiva, Europa	Ó	H		-			-	Extensão do trabalho de [117] para cadeias de abastecimento convergentes e fretes premium de saída
Benbitour et al. [119]	Indústria automobilística	Ó	H	-			-	-	Implementação do modelo proposto em uma aplicação real com economia de custos de até 66%
Beutel e Minner [73]	Indústria de varejo, Europa	VFE	A/O		-		-	-	Estrutura para planejamento de estoque de segurança usando fatores externos que afetam a demanda
Brander e Forsberg [51]	Indústria de estamparia de metais	DC	A/O –					-	O método proposto pode ser usado (em instalações únicas) para qualquer sequência cíclica fixa para a produção de múltiplos itens com demandas estocásticas
Bufa [66]	Setor de merchandising de varejo	VFE	A/O –					-	Redução significativa nos custos (de manutenção, falta de estoque, aquisição) em empresas multiprodutos
Cheng et al. [46]	Indústria farmacêutica	DC	A/O –				-	-	Mesma aplicação com [43, 44, 45] para um sistema de inventário de vários produtos
Disney e outros. [53]	Cadeias de abastecimento globais para transitários e retalhistas	DC	A/O –					-	Requisitos de estoque de segurança sob prazos estocásticos com cruzamento de pedidos
Gansterer et al. [116]	Indústria automobilística	Ó	H	-				-	Estrutura de otimização de simulação para encontrar o planejamento ideal parâmetros em ambientes de produção sob encomenda
Pendurado e Chang [89]	Indústria de wafers semicondutores	Ó	A/O –			-			Uso de tempo de fluxo e incertezas de rendimento para determinar estoques de segurança
Jonsson e Mattsson [35]	Diversos (fabricação, distribuição, indústrias atacadistas, Europa)	DC	S	-			-	-	O método do número de dias parece ser mais eficiente ao calcular os estoques de segurança para atingir uma taxa de atendimento de linha de pedido desejada para um grupo de itens do que a taxa de atendimento da demanda se aproxima
Kanet et al. [74]	Indústria automotiva, EUA	VFE	A/O –					-	Introdução de estoques de segurança planejados dinâmicos; 14% de economia em estoque de segurança em comparação com a solução obtida pela política de estoque de segurança constante
Kelle [28]	Indústrias siderúrgicas e têxteis, Hungria	VD	A/O –					-	Redução de custos de estoque, mantendo altos níveis de serviço
Keskin et al. [112]	Indústria de fabricação de pneus (BRISA), Turquia	Ó	A/O –				-	-	Implementação de um modelo de estoque de segurança MILP com produção realista restrições de processo em um ambiente industrial de grande escala
Lu et al. [56]	Indústria de construção	DC	A/O –				-		Aumento de 0 a 7% no nível de serviço e redução de 20 a 46% nos níveis de estoque em comparação à solução obtida com a regra do estoque de segurança do dia do abastecimento
Mertins e Lewandrowski [62]	Indústria de eletrônicos	DC	A/O		-		-	-	Redução dos custos de estoque de materiais em processo em 60%
Ozguven e Ozbay [37]	Furacão Katrina em Novo Orleães, EUA	DC	A/O –					-	Metodologia de controle de estoque para determinação de estoques mínimos de segurança de inventários de emergência em operações humanitárias
Pessoa et al. [83]	Indústrias de ar condicionado e catering, Itália	PSCS	A/O –				-	-	Implementação de método de estoque de segurança para subconjuntos de componentes; Redução dos estoques de segurança e minimização dos custos globais de SC
Potamianos et al. [67]	Indústria de eletrônicos	VFE	A/O –				-	-	Aplicação de método interativo de estoque de segurança; 26,9% de estoque economia de custos e redução de 25% de ruptura de estoque
Rafiei et al. [113]	Indústria de remanufatura de madeira	Ó	A/O –					-	Redução de 10,7% nas quantidades de pedidos pendentes
Rapold e Yono [111]	Indústria de fabricação de processos	Ó	A/O –					-	Modelo de estoque estocástico que pode ser usado para estimar estoques de segurança apoiar uma política de produção que estabilize a duração dos ciclos
Ruiz-Torres e Mahmoodi [61]	Indústria eletrônica	Ó	A/O –					-	Determinação do estoque de segurança sem fazer quaisquer suposições distributivas; ÿ 7% de economia de custos de manutenção
Srivastav e Agrawal [48]	Indústria farmacêutica	DC	A/O		-		-	-	Para facilitar o uso dos profissionais, equações de regressão são formuladas para o funções objetivo e variáveis de decisão (incluindo fator de segurança)
Teimory et al. [108]	Indústria de detergentes químicos (PAKSHOO), Irã	Ó	A/O –					-	Aplicação de técnicas de filas para desenvolver um modelo computacionalmente eficiente para determinação de estoque de segurança em um armazém com capacidade para vários itens
Trapero et al. [63]	Bens de consumo rápido fabricante, Reino Unido	VFE	A/O –				-	-	Abordagens paramétricas e não paramétricas para determinação de estoque de segurança
Trapero et al. [21]	Bens de consumo rápido fabricante, Reino Unido	VFE	A/O –				-	-	Combinação quantílica de abordagens empíricas para determinação de estoque de segurança
Tsu [44, 45]	Indústria farmacêutica	DC	A/O		-		-	-	Métodos flexíveis de otimização multiobjetivo que fornecem tamanhos de lote adequados e estoques de segurança de acordo com as preferências dos tomadores de decisão
Tsou e Kao [43]	Indústria farmacêutica	DC	A/O		-		-	-	Determinação do estoque de segurança sem usar qualquer medida substituta (por exemplo, nível de serviço ou custo de escassez) e informações de preferência prévia dos tomadores de decisão
Zhang et al. [120]	Grupo de logística internacional, China	O	A/O –				-	-	Rede neural de retropropagação para estimar estoques de segurança
Zhou e Viswanathan [97]	Indústria aeroespacial	Ó	A/O –				-	-	Abordagem de bootstrapping para determinação de estoque de segurança de itens intermitentes

Abreviaturas: VD = variação da demanda; VFE = variação dos erros de previsão; PSCS= Estrutura do Produto e Padronização de Componentes; O = Outros; A/O = Analítico/Otimização; H = Híbrido; S = Simulação.

6. Conclusão e orientações para pesquisas futuras

Este artigo apresenta os resultados de uma revisão sistemática da literatura para compreender o histórico de desenvolvimento e as tendências em relação ao problema de dimensionamento de estoque de segurança, a partir de uma perspectiva de pesquisa operacional (PO). Análises descritivas mostraram que extensas pesquisas foram realizadas para compreender esse problema, que está longe de ser um domínio fechado de pesquisa. Uma análise de conteúdo detalhada dos artigos coletados permitiu descrever estratégias de dimensionamento de estoques de segurança sob quatro perspectivas diferentes. Em cada um deles, cada artigo foi ainda caracterizado de acordo com o tipo de modelo, técnica de modelagem e critérios de desempenho empregados.

Como mostramos, extensas pesquisas foram conduzidas na aplicação de modelos e métodos baseados em OR para determinação de estoques de segurança. No entanto, extrair conhecimentos relevantes do problema de dimensionamento do stock de segurança e traduzi-los em benefícios práticos continua a ser um desafio. A seguir, destacamos as deficiências atuais e discutimos possíveis direções e tendências para pesquisas futuras no sentido de uma melhor determinação do estoque de segurança.

Generalizando a modelagem de demanda. Em primeiro lugar, tornou-se evidente que a gestão de inventários depende fortemente de procuras previstas com precisão, mas a questão de como prever a variação da procura no prazo de entrega – essencial para dimensionar stocks de segurança [51] – está longe de ser um tema fechado [11]. Nossas descobertas revelaram que vários estudos de pesquisa têm assumido demandas de lead time normalmente distribuídas, apesar da existência de vários trabalhos alertando contra essa suposição generalizada [60, 10, 61]. Além disso, diversas abordagens para dimensionamento de estoques de segurança consideram, muitas vezes, taxas de demanda constantes/estacionárias ou mesmo conhecidas [ver, eg, 78, 88, 91, 92, 96, 98, 115], que, em geral, não refletem a realidade das principais cadeias de fornecimento com ambientes multiprodutos, tipicamente caracterizados por demandas estocásticas com altos níveis de incerteza. Isso mostra a necessidade de obter resultados além dessas suposições determinísticas. Um ponto de partida válido e interessante poderia ser a exploração adicional de abordagens não paramétricas (por exemplo, redes neurais ou regressão vetorial de suporte) capazes de capturar de forma adequada e precisa a dinâmica real da demanda de SC ao longo do ciclo de vida do produto. Em segundo lugar, a procura de produtos poderá ser afectada por factores externos (por exemplo, condições meteorológicas ou volatilidade dos preços) que não são devidamente avaliados, ou nem sequer são avaliados, pelas actuais estratégias de dimensionamento dos stocks de segurança. Uma exceção a isso pode ser encontrada no trabalho de Beutel e Minner [73]. A integração de variáveis exógenas (se disponíveis) em modelos multivariados de previsão da procura seria um caminho de investigação atraente, mas desafiante. Finalmente, a aplicação de estimativas empíricas de estoques de segurança, como alternativa à abordagem teórica para estimar o desvio padrão dos erros de previsão para um determinado lead time, é outra área interessante que merece mais pesquisas. Remetemos ao leitor interessado neste tema os trabalhos de Trapero et al. [21, 63].

Modelagem de interrupções de fornecedores. Há uma nova tendência para o uso de análise de dados na previsão de interrupções nos fornecedores. Na verdade, no que diz respeito às contribuições baseadas empiricamente, as evidências sobre o papel da análise preditiva de dados na antecipação e gestão de interrupções futuras são surpreendentemente escassas [125]. Como o lead time é um fator crítico que afeta os estoques de segurança ideais, pesquisas futuras poderiam ser dedicadas ao desenvolvimento de sistemas de apoio à decisão baseados em aprendizado de máquina para modelar o desempenho de entrega do fornecedor. Esses sistemas podem ser construídos com base em modelos analíticos descritivos e preditivos e incluir mecanismos de geração de gatilhos/alertas que permitem melhorar a tomada de decisões. Este caminho de investigação não é apenas de interesse metodológico, no sentido de que não existem tais sistemas inteligentes na literatura atual, mas também de importância prática, uma vez que permite definir proativamente stocks de segurança dinâmicos para amortecer atrasos relacionados com os fo
No entanto, reconhecemos que as perturbações no fornecimento são notoriamente difíceis de prever, o que torna o desenvolvimento e a coordenação eficientes destes sistemas uma direção de investigação promissora.

Melhorar o conteúdo da informação. Consideramos que existe uma necessidade premente de formular modelos matemáticos que tenham em conta questões de qualidade dos dados na determinação do stock de segurança. Nesta revisão, os únicos trabalhos de pesquisa que dão conta desta questão são os de [59] e [69]. Do ponto de vista prático, muitas empresas enfrentam problemas de consistência e/ou integridade dos dados que dificultam a otimização da tomada de decisões baseada em dados. Ambos são-

Os processos se traduzem em estimativas imprecisas dos parâmetros do estoque de segurança, como a variação do erro de previsão do prazo de entrega, que depende muito da disponibilidade e da qualidade dos dados. Como um processo de tomada de decisão informado é tão bom quanto os dados nos quais se baseia, estudos adicionais podem investigar extensões de modelagem de estoques de segurança que considerem mecanismos para monitorar e controlar informações sobre a qualidade dos dados. Ao mesmo tempo, os gestores das empresas devem estar conscientes da importância de alcançar e manter dados de elevada qualidade, a fim de determinar stocks de segurança com boa relação custo-eficácia. Também encontrámos uma falta de estudos de caso reais relatados que aplicassem modelos de dimensionamento de stocks de segurança às principais cadeias de abastecimento com múltiplos produtos e, acima de tudo, com grandes quantidades de dados. Neste contexto, o termo Big Data Analytics (BDA) surgiu como uma área chave da SCM, ao fornecer ferramentas eficazes para melhorar os processos de tomada de decisão dependentes de um grande volume de dados. Em particular, a gestão dos stocks de segurança e o desempenho dos fornecedores podem beneficiar significativamente das abordagens BDA [126]. Dada a necessidade de uma gestão proativa de estoques de segurança [61], esta área também seria uma excelente direção de pesquisa a ser explorada, especialmente em sistemas de inventário da Indústria 4.0.

Desenvolvimento de avaliações empíricas de múltiplos produtos. Descobrimos que vários estudos de pesquisa têm sugerido modelos de estoques de segurança baseados em sistemas de estoque de produto único [ver, por exemplo, 42, 44, 88, 91, 94, 95, 100, 101, 48, 103]. Como a grande maioria das cadeias de suprimentos interopera com múltiplos produtos que, por sua vez, possuem características diferentes, os modelos de produto único não são capazes de capturar a dinâmica real dos ambientes de produção do mundo real, inviabilizando sua aplicação em empresas multiprodutos. Outras investigações sobre estoques de segurança devem se concentrar em abordagens de modelagem, apoiadas por estudos de caso reais, que englobem configurações de CS multiprodutos. Também relevante é a extração de insights históricos sobre as interações entre variáveis logísticas relevantes associadas aos diversos produtos (por exemplo, níveis e custos de estoque, variabilidade da demanda) e suas relações com os estoques de segurança. A aprendizagem não supervisionada pode ser uma abordagem razoável para perceber estas relações, bem como para identificar perfis de risco de inventário entre múltiplos produtos.

Melhorar a determinação do estoque de segurança nas etapas SC a montante. Por último, mas importante, se o objectivo final é estabelecer stocks de segurança ao nível dos componentes e não ao nível do produto acabado, outra via de investigação interessante diz respeito ao desenvolvimento de modelos de previsão que captem a procura de componentes por parte dos fabricantes sem ter de recorrer a informações do cliente final. previsões, que podem ser fortemente distorcidas por informações de mercado erráticas. Do ponto de vista da modelagem, existem duas abordagens clássicas para prever a demanda dos fabricantes por componentes: a primeira está alinhada com a metodologia de planejamento de requisitos de materiais (MRP) e aproveita a lista técnica para fornecer os requisitos dos componentes para períodos de tempo futuros. com base nas previsões do produto acabado. No entanto, por definição de BOM, se um determinado componente for usado para produzir um grande conjunto de produtos acabados, serão necessárias demandas previstas de todos esses produtos, a fim de fornecer ainda mais os requisitos do componente por meio de explosões de BOM. No final, este procedimento levaria tanto a erros de previsão cumulativos significativos como a custos relacionados com inventários. A segunda abordagem consiste em utilizar modelos univariados de previsão de séries temporais diretamente sobre registros históricos de demanda dos fabricantes, mas tal estratégia pode ser tendenciosa, uma vez que não utiliza informações do comportamento de demanda do(s) cliente(s). Assim, a integração de indicadores avançados relevantes da procura dos fabricantes em modelos de previsão pode ser uma oportunidade interessante para colmatar esta lacuna.

No geral, esta revisão permite concluir que o problema do dimensionamento do stock de segurança continua a ser um tema de investigação quente que apresenta desafios tanto para académicos como para profissionais. Acreditamos que este estudo poderá ser benéfico para promover o desenvolvimento de novas abordagens de modelização baseadas em OR, bem como para orientar os profissionais interessados na aplicação de modelos de dimensionamento de stocks de segurança em contextos reais da cadeia de abastecimento. No entanto, é importante reter que os estoques de segurança não devem ser usados como uma panaceia a ser aplicada em todos os problemas de gestão de estoques com questões de incerteza. Neste sentido, existe uma extensa literatura científica que propõe estratégias interessantes para aumentar a flexibilidade, a visibilidade e o desempenho dos processos de gestão do CS, dos quais faz parte o problema do dimensionamento dos stocks de segurança.

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer aos revisores anônimos por suas sugestões úteis. Este trabalho tem sido apoiado pela FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia no âmbito do Projecto das Unidades de I&D: UIDB/00319/2020, e pelos Fundos Europeus Estruturais e de Investimento na componente FEDER, através da Competitividade Operacional. e Programa de Internacionalização (COMPETE 2020) [Projeto nº. 39479, Referência de financiamento: POCI-01-0247-FEDER-39479].

Referências

[1] A. Gupta, CD Maranas, Gerenciando a incerteza da demanda no planejamento da cadeia de suprimentos, Computers & Chemical Engineering 27 (8-9) (2003) 1219–1227.

[2] S. Subrahmanyam, JF Pekny, GV Reklaitis, Projeto de fábricas de produtos químicos em lote sob incerteza de mercado, Industrial & Engineering Chemistry Research 33 (11) (1994) 2688–2701.

[3] Guia VDR Jr, R. Srivastava, Uma revisão de técnicas para proteção contra incerteza com sistemas MRP, Planejamento e Controle de Produção 11 (3) (2000) 223–233.

[4] CS Tang, Perspectivas na gestão de riscos da cadeia de suprimentos, International Journal of Production Economics 103 (2) (2006) 451–488.

[5] S. Chopra, G. Reinhardt, M. Dada, O efeito da incerteza do lead time nos estoques de segurança, Ciências da Decisão 35 (1) (2004) 1–24.

[6] AS Erugz, E. Sahin, Z. Jemai, Y. Dallery, Uma pesquisa abrangente de modelos de serviço garantido para otimização de estoque multi-echelon, International Journal of Production Eco-nomics 172 (2016) 110–125.

[7] DC Whybark, JG Williams, Planejamento de requisitos de materiais sob incerteza, Decisão Ciências 7 (4) (1976) 595–606.

[8] Y. Boulaksil, Colocação de estoque de segurança em cadeias de suprimentos com atualizações de previsão de demanda, Operations Research Perspectives 3 (2016) 27–31.

[9] SCL Koh, SM Saad, M. Jones, Incerteza sob fabricação planejada por MRP: revisão e categorização, International Journal of Production Research 40 (10) (2002) 2399–2421.

[10] M. Caridi, R. Cigolini, Melhorando a eficácia do gerenciamento de materiais: Um passo em direção à empresa ágil, International Journal of Physical Distribution & Logistics Management 32 (7) (2002) 556–576.

[11] AA Syntetos, Z. Babai, JE Boylan, S. Kolassa, K. Nikolopoulos, Previsão da cadeia de abastecimento: teoria, prática, sua lacuna e o futuro, European Journal of Operational Research 252 (1) (2016) 1–26 .

[12] D. Bogataj, B. Aver, M. Bogataj, Risco da cadeia de abastecimento em perturbações robustas simultâneas, Jornal Internacional de Economia de Produção 181 (2016) 68–78.

[13] R. Howells. A COVID-19 mudará para sempre as cadeias de abastecimento globais? [online] (2020) [citado em 11 de agosto de 2020].

[14] SC Graves, SP Willems, Otimizando a colocação estratégica de estoques de segurança nas cadeias de abastecimento, Gerenciamento de operações de manufatura e serviços 2 (1) (2000) 68–83.

[15] M. Schmidt, W. Hartmann, P. Nyhuis, Comparação baseada em simulação de métodos de cálculo de estoque de segurança, CIRP Annals-Manufacturing Technology 61 (1) (2012) 403–406.

[16] RG Brown, Suavização, previsão e previsão de séries temporais discretas, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1963.

[17] EA Silver, DF Pyke, R. Peterson, Gerenciamento de estoque e planejamento de produção e agendamento, vol. 3, Wiley Nova York, 1998.

[18] PH Zipkin, Fundamentos de gerenciamento de estoque, McGraw-Hill, Boston, 2000.

[19] EA Silver, DF Pyke, DJ Thomas, Gestão de estoque e produção em cadeias de suprimentos, CRC Press, 2016.

[20] S. Axs¨ater, Controle de estoque, Vol. 225, Springer, 2015.

[21] JR Trapero, M. Card´os, N. Kourentzes, Quantile prevê a combinação ideal para melhorar a estimativa do estoque de segurança, International Journal of Forecasting 35 (1) (2019) 239–250.

[22] D. Tranfield, D. Denyer, P. Smart, Rumo a uma metodologia para o desenvolvimento de conhecimento de gestão informado por evidências por meio de revisão sistemática, British Journal of Management 14 (3) (2003) 207–222.

[23] M. Petticrew, H. Roberts, Revisões sistemáticas nas ciências sociais: um guia prático, John Wiley & Sons, 2008.

[24] NJ Van Eck, L. Waltman, Pesquisa de software: Vosviewer, um programa de computador para bibliometria mapeamento, Scientometrics 84 (2) (2010) 523–538.

[25] B. Fahimnia, CS Tang, H. Davarzani, J. Sarkis, Modelos quantitativos para gestão de riscos da cadeia de abastecimento: Uma revisão, European Journal of Operational Research 247 (1) (2015) 1–15.

[26] DA Collier, Níveis agregados de estoque de segurança e comunalidade de componentes, Gestão Ciência 28 (11) (1982) 1296–1303.

[27] DA Collier, Os benefícios de medição e operação da comunalidade de partes componentes, Decision Sciences 12 (1) (1981) 85–96.

[28] P. Kelle, Sobre o problema do estoque de segurança para processos de entrega aleatória, European Journal of Operational Research 17 (2) (1984) 191–200.

[29] P. Kelle, EA Silver, Redução de estoque de segurança por divisão de pedidos, Logística de Pesquisa Naval (NRL) 37 (5) (1990) 725–743.

[30] EM Dar-El, CJ Malmborg, Estratégia melhorada para determinação de estoque de segurança baseada em nível de serviço minação, Planejamento e Controle de Produção 2 (2) (1991) 116–121.

[31] VA Vargas, R. Metters, Adaptando técnicas de dimensionamento de lotes à demanda estocástica por meio de política de programação de produção, IIE Transactions 28 (2) (1996) 141–148.

[32] G. Gallego, Programando a produção de vários itens com demandas aleatórias em um único instalação, Management Science 36 (12) (1990) 1579–1592.

[33] Z. Bahroun, N. Belgacem, Determinação de estoques de segurança dinâmicos para cronogramas de produção cíclicos, Operations Management Research 12 (1-2) (2019) 62–93.

[34] W. Benton, Estoque de segurança e níveis de serviço em sistemas de inventário de revisão periódica, Journal of the Operational Research Society 42 (12) (1991) 1087–1095.

[35] P. Jonsson, S.-A. Mattsson, Uma abordagem de diferenciação inerente e avaliação de nível de sistema para gerenciamento de estoque: Uma comparação de métodos de estoque de segurança, The International Journal of Logistics Management 30 (2) (2019) 663–680.

[36] K. Ozbay, EE Ozguven, modelo estocástico de controle de estoque humanitário para desastres planejamento, Registro de Pesquisa de Transporte 2022 (1) (2007) 63–75.

[37] EE Ozguven, K. Ozbay, Avaliação baseada em estudo de caso do modelo estocástico de gerenciamento de estoque de emergência de multicommodities, Transportation Research Record 2283 (1) (2012) 12–24.

[38] H. Jodlbauer, S. Reitner, Otimizando o nível de serviço e o custo relevante para um sistema estocástico de produção cíclica de vários itens, International Journal of Production Economics 136 (2) (2012) 306–317.

[39] RD Badinelli, Investimento ideal em estoque de segurança por meio de avaliação subjetiva de ruptura de estoque custos, Decision Sciences 17 (3) (1986) 312–328.

[40] M. Braglia, D. Castellano, M. Frosolini, Uma nova abordagem para o gerenciamento de estoque de segurança em uma cadeia de suprimentos coordenada com prazo de entrega controlável usando valor presente, Applied Stochastic Models in Business and Industry 32 (1) (2016) 99 –112.

[41] I. Darma Wangsa, HM Wee, Um modelo integrado de estoque entre fornecedor e comprador com custo de transporte e demanda estocástica, International Journal of Systems Science: Operations & Logistics 5 (4) (2018) 295–309.

[42] PJ Agrell, Uma estrutura multicritério para controle de estoque, International Journal of Production Economics 41 (1-3) (1995) 59–70.

[43] C.-S. Tsou, C.-H. Kao, Controle de estoque multiobjetivo usando meta-heurística semelhante ao eletromagnetismo, International Journal of Production Research 46 (14) (2008) 3859–3874.

[44] C.-S. Tsou, Planejamento de estoque multiobjetivo usando MOPSO e TOPSIS, Expert Systems with Applications 35 (1-2) (2008) 136–142.

[45] C.-S. Tsou, Otimizadores evolutivos de pareto para sistemas de inventário estocástico de revisão contínua, European Journal of Operational Research 195 (2) (2009) 364–371.

[46] L. Cheng, C.-S. Tsou, D.-Y. Yang, Análise de compensação de custo-serviço de modelos de estoque de tamanho de lote de ponto de pedido, Journal of Manufacturing Systems 37 (2015) 217–226.

[47] A. Srivastav, S. Agrawal, Otimização multiobjetivo do modelo híbrido de estoque de pedidos em espera, Sistemas Especialistas com Aplicações 51 (2016) 76–84.

[48] A. Srivastav, S. Agrawal, Otimização multiobjetiva de um sistema de inventário de mistura usando uma abordagem híbrida MOPSO – TOPSIS, Transactions of the Institute of Measurement and Control 39 (4) (2017) 555–566.

[49] P. Alstrøm, Computação numérica de políticas de estoque, com base no valor eoq/ÿx para sistemas de pontos de pedido, International Journal of Production Economics 71 (1-3) (2001) 235–245.

[50] JC Hayya, TP Harrison, DC Chatfield, Uma solução para o modelo de estoque intratável quando a demanda e o lead time são estocásticos, International Journal of Production Eco-nomics 122 (2) (2009) 595–605.

[51] P. Brander, R. Forsberg, Determinação de estoques de segurança para cronogramas cíclicos com demandas estocásticas, International Journal of Production Economics 104 (2) (2006) 271–295.

[52] T. Man-Yi, T. Xiao-Wo, O estudo adicional do estoque de segurança em ambiente incerto, Otimização Fuzzy e Tomada de Decisão 5 (2) (2006) 193–202.

[53] SM Disney, A. Maltz, X. Wang, RD Warburton, Gerenciamento de estoque para prazos de entrega estocásticos com cruzamentos de pedidos, European Journal of Operational Research 248 (2) (2016) 473–486.

[54] K. Inderfurth, S. Vogelgesang, Conceitos para determinação de estoque de segurança sob demanda estocástica e diferentes tipos de rendimento de produção aleatório, European Journal of Operational Research 224 (2) (2013) 293–301.

[55] K. Inderfurth, Como proteger contra riscos de demanda e rendimento em sistemas MRP, International Journal of Production Economics 121 (2) (2009) 474–481.

[56] H. Lu, H. Wang, Y. Xie, H. Li, Determinação do estoque de segurança de materiais de construção sob demanda estocástica não estacionária e rendimento de fornecimento aleatório, IEEE Transactions on Engineering Management 63 (2) (2016) 201– 212.

[57] C.-F. Hsueh, Um modelo de controle de estoque levando em consideração a remanufatura e o ciclo de vida do produto, International Journal of Production Economics 133 (2) (2011) 645–652.

[58] JM Charnes, H. Marmorstein, W. Zinn, Determinação de estoque de segurança com demanda serialmente correlacionada em um sistema de inventário de revisão periódica, Journal of the Operational Research Society 46 (8) (1995) 1006–1013.

[59] A. Kumar, PT Evers, Definir estoque de segurança com base em registros imprecisos, International Journal of Production Economics 169 (2015) 68–75.

[60] GD Eppen, RK Martin, Determinando o estoque de segurança na presença de lead time estocástico e demanda, Management Science 34 (11) (1988) 1380–1390.

[61] AJ Ruiz-Torres, F. Mahmoodi, Determinação de estoque de segurança com base em tempo de entrega paramétrico e informações de demanda, International Journal of Production Research 48 (10) (2010) 2841–2857.

[62] K. Mertins, U. Lewandrowski, Estoques de segurança de sistemas de controle kanban, Planejamento e Controle de Produção 10 (6) (1999) 520–529.

[63] JR Trapero, M. Card´os, N. Kourentzes, Estimativa empírica de estoque de segurança baseada em kernel e modelos garch, Omega 84 (2019) 199–211.

[64] S. Fotopoulos, M.-C. Wang, SS Rao, Determinação do estoque de segurança com demandas correlacionadas e prazos de entrega arbitrários, European Journal of Operational Research 35 (2) (1988) 172–181.

[65] RN Boute, SM Disney, MR Lambrecht, B. Van Houdt, Coordenação de prazos de entrega e estoques de segurança sob demanda autocorrelacionada, European Journal of Operational Research 232 (1) (2014) 52–63.

[66] FP Buffa, Um modelo para alocar recursos limitados ao tomar decisões sobre estoques de segurança, Decision Sciences 8 (2) (1977) 415–426.

[67] J. Potamianos, A. Orman, A. Shahani, Modelagem para um sistema dinâmico de controle de produção de estoque, European Journal of Operational Research 96 (3) (1997) 645–658.

[68] A. Reichhart, JM Framinan, M. Holweg, Sobre a ligação entre estoque e capacidade de resposta em cadeias de suprimentos de vários produtos, International Journal of Systems Science 39 (7) (2008) 677–688.

[69] H.-M. Hsu, W.-P. Wang, Programação possibilística no planejamento de produção de ambientes de montagem sob pedido, Conjuntos Fuzzy e Sistemas 119 (1) (2001) 59–70.

[70] JG Wacker, Uma teoria do planejamento de requisitos de materiais (MRP): uma metodologia empírica para reduzir a incerteza em sistemas MRP, International Journal of Production Research 23 (4) (1985) 807–824.

[71] GM Campbell, Estabelecendo estoques de segurança para cronogramas mestres de produção, Planejamento e Controle de Produção 6 (5) (1995) 404–412.

[72] X. Zhao, F. Lai, T. Lee, Avaliação de métodos de estoque de segurança em sistemas multiníveis de planejamento de requisitos de materiais (MRP), Planejamento e Controle de Produção 12 (8) (2001) 794–803.

[73] A.-L. Beutel, S. Minner, Planejamento de estoque de segurança sob previsão de demanda causal, Interna- Journal of Production Economics 140 (2) (2012) 637–645.

[74] JJ Kanet, MF Gorman, M. St¨oßlein, Estoques de segurança planejados dinâmicos em redes de abastecimento, International Journal of Production Research 48 (22) (2010) 6859–6880.

[75] S. Helber, F. Sahling, K. Schimmelpfeng, Dimensionamento de lote capacitado dinâmico com determinação aleatória mand e estoques de segurança dinâmicos, OR Spectrum 35 (1) (2013) 75–105.

[76] L. Abdel-Malek, T. Kullpattaranirun, S. Nanthavanij, Uma estrutura para comparar estratégias de terceirização em cadeias de suprimentos multicamadas, International Journal of Production Economics 97 (3) (2005) 318–328.

[77] Z. Lian, A. Deshmukh, J. Wang, O período congelado ideal em um modelo de produção dinâmico, International Journal of Production Economics 103 (2) (2006) 648–655.

[78] RC Carlson, CA Yano, Estoques de segurança em sistemas MRP com configurações de emergência para componentes, Management Science 32 (4) (1986) 403–412.

[79] CA Yano, RC Carlson, Interação entre a frequência de reprogramação e o papel do estoque de segurança nos sistemas de planejamento de requisitos de materiais, International Journal of Production Research 25 (2) (1987) 221–232.

[80] RW Grubbstr¨om, Uma abordagem de valor presente líquido para estoques de segurança na produção planejada, International Journal of Production Economics 56 (1998) 213–229.

[81] RW Grubbstr¨om, Uma abordagem de valor presente líquido para estoques de segurança em um sistema MRP multinível, International Journal of Production Economics 59 (1-3) (1999) 361–375.

[82] A. Molinder, Otimização conjunta de tamanhos de lote, estoques de segurança e prazos de entrega de segurança em um sistema MRP, International Journal of Production Research 35 (4) (1997) 983–994.

[83] A. Persona, D. Battini, R. Manzini, A. Pareschi, Níveis ideais de estoque de segurança de subconjuntos e componentes de fabricação, International Journal of Production Economics 110 (1-2) (2007) 147–159.

[84] PD Van Ness, WJ Stevenson, Modelos de pontos de reordenamento com distribuição de probabilidade discreta ções, Decision Sciences 14 (3) (1983) 363–369.

[85] B. Van der Veen, Estoques de segurança e o paradoxo do período vazio, European Journal of Operational Research 16 (1) (1984) 19–33.

[86] H. Groenevelt, L. Pintelon, A. Seidmann, Lotes de produção com quebras de máquina e estoques de segurança, Operations Research 40 (5) (1992) 959–971.

[87] P. Glasserman, Limites e assintóticos para planejar estoques de segurança críticos, Operations Re-
pesquisa 45 (2) (1997) 244–257.

[88] KL Cheung, WH Hausman, Determinação conjunta de manutenção preventiva e estoques de segurança em um ambiente de produção não confiável, Naval Research Logistics (NRL) 44 (3) (1997) 257–272.

[89] Y.-F. Hung, C.-B. Chang, Determinando estoques de segurança para planejamento de produção em manufatura incerta, International Journal of Production Economics 58 (2) (1999) 199–208.

[90] T. Dohi, H. Okamura, S. Osaki, Controle ideal do cronograma de manutenção preventiva e estoques de segurança em um ambiente de fabricação não confiável, International Journal of Production Economics 74 (1-3) (2001) 147–155.

[91] F. Martinelli, P. Valigi, As políticas de ponto de cobertura permanecem ótimas sob backlog limitado e espaço de estoque, IEEE Transactions on Automatic Control 49 (10) (2004) 1863–1871.

[92] A. Gharbi, J.-P. Kenn´e, M. Beit, Estoques de segurança ideais e períodos de manutenção preventiva em sistemas de fabricação não confiáveis, International Journal of Production Economics 107 (2) (2007) 422–434.

[93] P. Wang, W. Zinn, KL Croxton, Dimensionando o estoque quando o lead time e a demanda estão correlacionados, Production and Operations Management 19 (4) (2010) 480–484.

[94] B. Sarkar, SS Sana, K. Chaudhuri, Confiabilidade ideal, tamanho do lote de produção e estoque de segurança: um modelo econômico de quantidade de fabricação, International Journal of Management Science and Engineering Management 5 (3) (2010) 192–202.

[95] SS Sana, K. Chaudhuri, Um modelo EMQ em um processo de produção imperfeito, Internacional Journal of Systems Science 41 (6) (2010) 635–646.

[96] J. Hayya, TP Harrison, Um modelo de inventário de tempo de espera de imagem espelhada, International Journal de Pesquisa de Produção 48 (15) (2010) 4483–4499.

[97] C. Zhou, S. Viswanathan, Comparação de um novo método de bootstrapping com abordagens paramétricas para determinação de estoque de segurança em sistemas de estoque de peças de serviço, International Journal of Production Economics 133 (1) (2011) 481–485.

[98] T. Chakraborty, B. Giri, Determinação conjunta de estoques de segurança ideais e política de produção para um sistema de produção imperfeito, Applied Mathematical Modeling 36 (2) (2012) 712–722.

[99] KH Van Donselaar, RA Broekmeulen, Determinação de estoques de segurança em um sistema de estoque de vendas perdidas com revisão periódica, prazo de entrega positivo, dimensionamento de lote e taxa de preenchimento alvo, International Journal of Production Economics 143 (2) (2013) 440–448.

[100] A. Chaturvedi, V. Mart´ÿnez-de Alb´eniz, Estoque de segurança, excesso de capacidade ou diversificação: Trade-offs sob incerteza de oferta e demanda, Gestão de Produção e Operações 25 (1) (2016) 77–95.

[101] R. Manzini, R. Accorsi, E. Ferrari, M. Gamberi, V. Giovannini, H. Pham, A. Persona, A. Regattieri, Weibull vs. distribuição normal da demanda para determinar o nível de estoque de segurança ao usar o modelo de revisão contínua (S, s) sem atrasos, International Journal of Logistics Systems and Management 24 (3) (2016) 298–332.

[102] L. Huang, J.-S. Song, J. Tong, Planejamento da cadeia de suprimentos para picos aleatórios de demanda: capacidade reativa e estoque de segurança, Manufacturing & Service Operations Management 18 (4) (2016) 509–524.

[103] H. Cáceres, D. Yu, A. Nikolaev, Avaliando distribuições de déficit em sistemas de inventário periódico com demandas endógenas estocásticas e prazos de entrega, Annals of Operations Research (2018) 1–23.

[104] K. Altendorfer, Efeito da capacidade limitada nos parâmetros de planejamento ideais para um sistema de produção de vários itens com tempos de configuração e informações antecipadas de demanda, International Journal of Production Research 57 (6) (2019) 1892–1913.

[105] KE Bourland, CA Yano, O uso estratégico da folga de capacidade no problema de agendamento de lotes econômicos com demanda aleatória, Management Science 40 (12) (1994) 1690–1704.

[106] LOA Maia, RY Qassim, Estoques de segurança de custo mínimo para fabricação com entrega frequente, International Journal of Production Economics 62 (3) (1999) 233–236.

[107] M.-AO Louly, A. Dolgui, Calculando estoques de segurança para sistemas de montagem com prazos de entrega de aquisição de componentes aleatórios: Um algoritmo branch and bind, European Journal of Operational Research 199 (3) (2009) 723–731.

[108] E. Teimoury, M. Modarres, F. Ghasemzadeh, M. Fathi, Uma abordagem de filas para planejamento de estoque de produção para cadeia de suprimentos com demandas incertas: estudo de caso da empresa química pakshoo, Journal of Manufacturing Systems 29 (2 -3) (2010) 55–62.

[109] GK Janssens, KM Ramaekers, Uma formulação de programação linear para um problema de decisão de gerenciamento de estoque com uma restrição de serviço, Expert Systems with Applications 38 (7) (2011) 7929–7934.

[110] AA Taleizadeh, STA Niaki, F. Barzinpour, Problema da cadeia de suprimentos com múltiplas restrições, vários compradores, vários fornecedores, vários produtos e múltiplas restrições, com demanda estocástica e lead time variável: um algoritmo de busca de harmonia, Matemática Aplicada e Computação 217 (22) (2011) 9234–9253.

[111] JA Rappold, KD Yoho, Definindo estoques de segurança para cronogramas de ciclo de rotação estáveis, Inter-Jornal Nacional de Economia de Produção 156 (2014) 146–158.

[112] GA Keskin, S. I. Omurca, N. Aydÿn, E. Ekinci, Um estudo comparativo do modelo produção-estoque para determinar a quantidade efetiva de produção e o nível de estoque de segurança, Applied Mathematical Modeling 39 (20) (2015) 6359–6374.

[113] R. Rafiei, M. Nourelfath, J. Gaudreault, LA De Santa-Eulalia, M. Bouchard, Estoque de segurança dinâmico em fábricas de remanufatura de madeira orientadas pela demanda de coprodução: um estudo de caso, International Journal of Production Economics 165 (2015) 90–99.

[114] O. Ben-Ammar, B. Bettayeb, A. Dolgui, Otimização do planejamento de fornecimento multiperíodo sob prazos estocásticos e uma demanda dinâmica, International Journal of Production Economics 218 (2019) 106–117.

[115] B. Bouslah, A. Gharbi, R. Pellerin, Produção conjunta e controle de qualidade de sistemas de fabricação em lote não confiáveis com inspeção de retificação, International Journal of Production Research 52 (14) (2014) 4103–4117.

[116] M. Gansterer, C. Almeder, RF Hartl, Métodos de otimização baseados em simulação para definir parâmetros de planejamento de produção, International Journal of Production Economics 151 (2014) 206–213.

[117] MG Avci, H. Selim, Uma estrutura de otimização multiobjetivo baseada em simulação para fornecimento cadeias com fretes premium, Expert Systems with Applications 67 (2017) 95–106.

[118] MG Avci, H. Selim, Uma abordagem de otimização baseada em simulação multiobjetivo para problemas de reposição de estoque com fretes premium em cadeias de suprimentos convergentes, Omega 80 (2018) 153–165.

[119] MH Benbitour, E. Sahin, Y. Dallery, O uso de entregas urgentes em sistemas de montagem sob pedido de revisão periódica, International Journal of Production Research 57 (13) (2019) 4078–4097.

[120] F. Zhang, P. Jiang, J. Li, J. Hui, B. Zhu, Um esquema de configuração distribuída para sistema de serviço de produto de armazém, Advances in Mechanical Engineering 9 (5) (2017) 1687814017706434.

[121] G. Figueira, B. Almada-Lobo, Métodos híbridos de simulação-otimização: Uma taxonomia e discussão, Prática e Teoria de Modelagem de Simulação 46 (2014) 118–134.

[122] N. Kourentzes, DK Barrow, SF Crone, Operadores de conjuntos de redes neurais para previsão de séries temporais, Expert Systems with Applications 41 (9) (2014) 4235–4244.

[123] RJ Kuo, YC Wang, FC Tien, Integração de rede neural artificial e métodos MADA para seleção de fornecedores verdes, Journal of Cleaner Production 18 (12) (2010) 1161–1170.

[124] B. McKelvey, C. Wycisk, M. H¨ulsmann, Projetando um mercado de leilão eletrônico para logística complexa de 'peças inteligentes': opções baseadas no mercado de ações computacional de lebaron, International Journal of Production Economics 120 (2) (2009) 476–494.

[125] A. Brintrup, J. Pak, D. Ratiney, T. Pearce, P. Wichmann, P. Woodall, D. McFarlane, Análise de dados da cadeia de suprimentos para prever interrupções de fornecedores: um estudo de caso na fabricação de ativos complexos, Jornal Internacional de Pesquisa de Produção 58 (11) (2020) 3330–3341.

[126] B. Roßmann, A. Canzaniello, H. von der Gracht, E. Hartmann, O futuro e o impacto social da análise de big data na gestão da cadeia de suprimentos: Resultados de um estudo Delphi, Previsão Tecnológica e Mudança Social 130 (2018) 135–149.